

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Vladislav MARKOVIČ

DAUGIAFUNKCIŲ PAVIRŠIŲ IŠ GELEŽIES-NIKELIO-KOBALTO MILTELINIŲ MEDŽIAGŲ FORMAVIMAS IR TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (08T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2018

Disertacija rengta 2012–2018 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

doc. dr. Olegas ČERNAŠEJUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

dr. Viktor GRIBNIAK (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T).

Nariai:

dr. Justinas GARGASAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T),

dr. Rasa KANDROTAITĖ JANUTIENĖ (Kauno technologijos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T),

habil. dr. Jaroslaw KONIECZNY (Silezijos technologijos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T),

prof. dr. Vytautas TURLA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2018 m. rugpjūčio 29 d. 14 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti **2018 m. liepos 27 d.**

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2018-036-M mokslo literatūros knyga

<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-476-122-5

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2018

© Vladislav Markovič, 2018

vladislavmarkowicz@gmail.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Vladislav MARKOVIČ

THE FORMATION AND INVESTIGATION OF
MULTIFUNCTIONAL SURFACES FROM
IRON-NICKEL-COBALT POWDER
MATERIALS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MATERIALS ENGINEERING (08T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2018

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2012–2018.

Supervisor

Assoc. Prof. Dr Olegas ČERNAŠĖJUS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Materials Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Dr Viktor GRIBNIAK (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T).

Members:

Dr Justinas GARGASAS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T),

Dr Rasa KANDROTAITĖ JANUTIENĖ (Kaunas University of Technology, Materials Engineering – 08T),

Dr Habil. Jaroslaw KONIECZNY (Silesian University of Technology, Materials Engineering – 08T),

Prof. Dr Vytautas TURLA (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – 09T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Materials Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **2 p. m. on 29 August 2018**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania. Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send **on 27 July 2018**.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjami selektyviuoju lazerinio sukepinimo (SLS) būdu iš Fe-Ni-Co pagrindo miltelių gauti sukepintieji gaminiai, skirti naudoti įvairiose pramonės šakose (pvz., polimerų liejimo formų gamyboje ir kt.) esant sunkioms darbo sąlygoms. Jų eksploatacinėms savybėms pagerinti pasiūlytas sukepintų paviršių lazerinis mikroapdorojimas. Lazerinis mikroapdorojimas – tai lazerinio apdorojimo procesas, kurio poveikis apdorojamam paviršiui vertinamas mikroskaleje. Disertacijos tikslas – sukurti ir ištirti daugiafunkcij, miltelinio pagrindo paviršių ir nustatyti priklausomybę tarp lazerinio apdorojimo koncentruotosios energijos pluošto technologinių parametų pokyčio ir apdorojamo paviršiaus kokybinių charakteristikų. Tyrimais siekiama pagerinti sukepinto paviršiaus eksploatacines savybes bei suteikti jam naujų kokybinių charakteristikų. Papildomas SLS būdu sukepinto paviršiaus lazerinis apdorojimas leis taupyti gamybos laiką ir ekonominius išteklius dėl sumažėjusio technologinių operacijų kiekio, lyginant su tradiciniais SLS būdu sukepintų paviršių apdorojimo būdais.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, literatūros ir autorius publikacijų disertacijos tema sąrašai bei penki priedai. Įvadiniam skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra. Pirmajame skyriuje apžvelgiami adityviosios gamybos ypatumai, sukepinimo technologijos fizikiniai principai ir taikymo sritys, sukepintų gaminių apdorojimas tradiciniais ir inovatyviais būdais, sukepintų paviršių modifikavimo metodai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai. Antrajame skyriuje aprašomos darbe naudotos žaliavos ir įrenginiai, darbe taikomi medžiagų ir jų savybių tyrimo metodai. Trečiajame skyriuje pateikiami ir analizuojami sukepintų bei modifikuotų gaminių sandaros tyrimų rezultatai, neapdorotų ir apdorotų paviršių mikrostruktūros, morfologijos ir topografijos tyrimai, modifikuotų paviršių mikrokietumo, atsparumo dilimui ir korozijai tyrimų rezultatai.

Disertacijos tema paskelbti 8 straipsniai, o tyrimų rezultatai pristatyti 10 mokslinių konferencijų Lietuvoje ir užsienyje.

Abstract

In the thesis, sintered products formed from Fe-Ni-Co powder base using selective laser sintering that are used in various industries (for example in production of plastic injection tools) in severe working conditions are investigated. Laser microprocessing was used to improve performance and multifunctionality of the sintered surfaces. Laser microprocessing – is a laser machining process, where laser impact is measured in microscale. The aim of the dissertation is to investigate and create a multifunctional powder base surface and to determine the relationship between the change in the technological parameters of the laser beam microprocessing and the qualitative characteristics of the treated surface. The goal is to improve the performance of the sintered surface and give it new quality characteristics. It will help to save production time and economical resources.

The thesis includes the introduction, three chapters, the general conclusions, the list of reference, the list of publications of the author and five annexes. In the introduction, the problem under the investigation and the topicality of the work are discussed upon, the object of the investigation is described, the aim and the tasks of the work are formulated, the research methods, the scientific novelty of the work, the practical significance of its results and the defended statement are described. In the end of the introduction, publications of the author and his reports at conference on the subject of the thesis as well as the structure of the thesis are presented. In the Chapter 1, features of additive production, physical principles and application of sintering technology, processing of sintered products by traditional and innovative methods, methods for modifying sintered surfaces are reviewed. At the end of the chapter conclusions are formulated and the tasks of the dissertation are revised. In the Chapter 2, the equipment and raw material used in the work and its properties and applied research methods are described. In the Chapter 3, structure analysis of the sintered and modified products, microstructures of the processed and non processed surfaces, morphology and topographics analysis, microhardness, wear and corrosion resistance analysis results are presented and discussed. Materials of the thesis have been published in eight scientific publications and presented at 10 scientific conferences held in Lithuania and abroad.

Žymenys

Simboliai

E – įvedamosios energijos lygmuo, W/cm^2 ;
 d – lazerio spindulio pluošto dėmės plotas bandinio paviršiuje, mm^2 ;
 E_i – vieno impulso energija, J ;
 E_{it} – impulso energijos tankis, J/cm^2 ;
 E_{its} – energijos kiekis apdorojimo paviršiuje per vieną sekundę, W/cm^2 ;
 n – mikrolazerinio apdorojimo ėjimų skaičius;
 P – mikrolazerinio apdorojimo galia, W ;
 v – mikrolazerinio apdorojimo greitis, mm/s ;
 v' – mikrolazerinio apdorojimo atskaitos greitis, mm/s ;
 Z – apdorojimo ir atskaitos greičių santykis;
 ν – impulsų generavimo dažnis, Hz ;
 λ – spinduliuotės bangos ilgis, nm ;
 τ – impulso trukmė, ns ;

Santrumpos

A1–A12 – A eksperimento bandinių žymenys;
AG – adityvioji gamyba;
B1–B3 – B eksperimento bandinių žymenys;
C1–C12 – C eksperimento bandinių žymenys;
D1–D14 – D eksperimento bandinių žymenys;

KCT – kubinė, centruoto tūrio gardelė;

N – neapdorotas bandinys;

SLS – selektyvusis lazerinis sukepinimas;

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimo objektas	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamasis teiginys	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	5
 1. ADITYVIOSIOS GAMYBOS IR METALINIŲ PAVIRŠIŲ MODIFIKAVIMO YPATUMŲ ANALIZĖ.....	 7
1.1. Adityvioji gamyba.....	7
1.1.1. Adityviosios gamybos plėtra	7
1.1.2. Selektyvusis lazerinis sukepinimas	9
1.2. Tradicinių metalinių paviršių apdorojimo būdų apžvalga	11
1.3. Inovatyviųjų metalinių paviršių apdorojimo būdų apžvalga	15
1.3.1. Apdorojimas lazerio spindulio pluoštu	15
1.3.2. Medžiagų mikroapdorojimas lazeriu spindulio pluoštu.....	15
1.4. Lazerio spindulio pluošto ir inžinerinių medžiagų sąveika	20

1.4.1. Lazerio spindulio pluošto poveikis apdirbamo metalo paviršiui	22
1.4.2. Faziniai virsmai lazerio spindulio veikiamo metalo paviršiuje	25
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	26
2. NAUDOTOS MEDŽIAGOS IR SUKEPINTO MILTELINIO GELEŽIES- NIKELIO-KOBALTO PAGRINDO PAVIRŠIAUS TYRIMO METODAI	29
2.1. Tyrimams naudotos medžiagos	29
2.2. Selektivityojo lazerinio sukepinimo technologijos įranga, parametrai ir charakteristikos	31
2.3. Paviršiaus modifikavimo įranga ir parametrai	32
2.4. Technologiniai eksperimento parametrai	34
2.5. Eksperimentinio tyrimo metodika	36
2.5.1. Optinė mikroskopija	36
2.5.2. Skenuojamoji elektroninė mikroskopija ir rentgeno mikroanalizė	36
2.5.3. Rentgeno spindulių difrakcijos analizė	37
2.5.4. Paviršiaus šiurkščio matavimas	37
2.5.5. Mikrokietumo matavimai	37
2.5.6. Tribologiniai tyrimai	38
2.5.7. 3D optinė profilometrija	38
2.5.8. Korozinio atsparumo bandymai.....	39
2.6. Antrojo skyriaus išvados	39
3. SUKEPINTŲ MILTELINIO PAGRINDO PAVIRŠIŲ MODIFIKAVIMO KONCENTRUOTOSIOS ENERGIJOS ŠALTINIŲ PROCESO IR EKSPLOATACINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI.....	41
3.1. Sukeptintų ir koncentruotosios energijos šaltinių apdorotų bandinių topografijos analizė.....	41
3.2. Profilometrijos analizė	52
3.3. Mikrokietumo analizė.....	59
3.4. Dilimo analizė	61
3.5. Cheminė analizė	69
3.6. Mikrostruktūros analizė.....	70
3.7. Fazinė analizė.....	72
3.8. Atsparumas elektrocheminei korozijai	76
3.9. Trečiojo skyriaus išvados	77
BENDROSIOS IŠVADOS	81
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	83
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS... 91	91
SUMMARY IN ENGLISH.....	93

PRIEDAI ¹	109
A priedas. Geležies lydiniams legiruoti dažniausiai naudojami legiruojantieji elementai.....	110
B priedas. A–D eksperimentinių tyrimų technologinių parametrų reikšmės	112
C priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija	114
D priedas. Bendraautorijų sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje	115
E priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	124

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem	1
Relevance of the thesis	2
The object of research	3
The aim of the thesis	3
The tasks of the thesis	3
The research methodology	3
Scientific novelty of the thesis	4
Practical value of the research findings	4
Defended statment.....	5
Approval of the research findings	5
The structure of the dissertation	5
1. THE PECULIARITY ANALYSIS OF THE ADDITIVE MANUFACTURING AND MODIFICATION OF THE METALIC SURFACES	7
1.1. Additive manufacturing.....	7
1.1.1. The development of the additive manufacturing	7
1.1.2. Selective laser sintering.....	9
1.2. The review of the tradicional metalic surfaces processing ways.....	11
1.3. The review of innovative metalic surfaces processing ways	15
1.3.1. Laser beam processing	15
1.3.2. Laser beam microprocessig of the materials.....	15
1.4. The relationship between the laser beam and engineering materials.....	20

1.4.1. The influence of the laser beam on the processed surface of metal	22
1.4.2. Phase changes of the surface metal influenced by laser beam.....	25
1.5. The conclusions of the first chapter and formulation of the objectives of the thesis.....	26
2. MATERIALS USED AND METHODS OF INVESTIGATION OF THE SINTERED SURFACE BASED ON IRON-NICKEL-COBALT POWDER.....	29
2.1. The materials used for the investigation.....	29
2.2. Equipment, parameters and characteristics of the selective laser sintering technology	31
2.3. Equipment and parameters of the surface modification	32
2.4. Technological parameters of the experiment.....	34
2.5. The methodic of the experiment investigation	36
2.5.1. Optical microscopy	36
2.5.2. Scanning electron beam microscopy and X-ray microanalysis.....	37
2.5.3. X-ray diffraction analysis.....	37
2.5.4. Profilometry	37
2.5.5. Microhardness measurements	38
2.5.6. Tribological tests.....	38
2.5.7. 3D optical profilometry.....	39
2.5.8. Corrosion resistance tests	39
2.6. The conclusions of the second chapter	39
3. THE INVESTIGATION OF THE PROCESS OF MODIFYING THE SURFACE OF SINTERED SPECIMENS BASED ON POWDER BY A CONCENTRATED ENERGY SOURCE AND THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF THE SPECIMENS.....	41
3.1. The topography analysis of the sintered and laser processed samples	41
3.2. Profilometry analysis.....	52
3.3. Microhardness analysis	59
3.4. Wear analysis	61
3.5. Chemical analysis.....	69
3.6. Microstructure analysis	70
3.7. Phase analysis.....	72
3.8. The analysis of the electrochemical corrosion resistance	76
3.9. The conclusions of the third chapter	77
GENERAL CONCLUSIONS	81
REFERENCES	83
THE LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	91

SUMMARY IN ENGLISH.....	93
ANNEXES ²	109
Annex A. The most used alloying elements of the iron alloys.....	110
Annex B. The values of the technological parameters of the experimental investigations A–D	112
Annex C. Declaration of academic Integrity	114
Annex D. The co-authors' agreements to present publications for the dissertation defence	115
Annex E. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation.....	124

² The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Ivadas

Problemos formulavimas

Pastaruoju metu daug dėmesio skiriama sudėtingos formos, pažangių ir inovatyvių produktų gamybai. Daugeliu atvejų, siekiant pagerinti detalių, mazgų ar įrenginių eksploatacines charakteristikas, detalių viduje būtina suformuoti sudėtingas aušinimo, tepimo ar oro kanalų erdvines sistemas, nepažeidžiant ir nepakeičiant išorinės gaminio formos. Šiam tikslui pasiekti naudojama selektyviojo lazerinio sukepinimo (angl. *Selective Laser Sintering* arba SLS) technologija.

SLS technologijos dėka užtikrinamas aukštas detalių formos tikslumas ($\pm 30 \mu\text{m}$) ir gamybos atkartojamumas (reprodukcija), tačiau šiuo metu platesnis metalo selektyviojo lazerinio sukepinimo taikymas yra apribotas dėl šiai technologijai būdingų trūkumų (mažas atsparumas korozijai, didelis paviršiaus šiurkštumas, nevienodas sukepinto metalo kietumas ir kita). Metalo miltelių sukepinimas lazeriu yra daugkartinis procesas, kurio metu susidaro savita struktūra, kurios pagrindinis ypatumas yra susisiekančių skirtingo dydžio porų sistema. Formuojant kiekvieną sluoksnį vyksta medžiagos užgrūdinimas esant dideliame temperatūros gradientui, dėl to sukepintame metale susidaro ženklūs liekamieji tempimo įtempiai. Tai lemia, kad SLS būdu sukepinto metalo mechaninės ir tribologinės savybės neprilygsta tradiciniu liejimu suformuotiems plieno gami-

niams. Dėl nepalankių eksploatacijos sąlygų (dideli temperatūriniai svyravimai, dilimo poveikis, drėgmė ir kt.) sukepintų gaminių eksploatacijos laikas tesiekia 2–3 metus.

Šiuo metu gamyboje yra didelis poreikis naujų, inovatyvių apdorojimo būdų, skirtų sukepintų gaminių paviršiams apdoroti ir modifikuoti. Lazerinių technologijų panaudojimo galimybės ir suteikiami privalumai pagerintų detalių, mazgų bei gaminių eksploataavimo savybes ir sumažintų eksploatacines išlaidas.

Siūlomi tradiciniai sukepintų geležies pagrindo paviršių apdorojimo ir modifikavimo būdai yra labai brangūs ir reikalauja didelių laiko sąnaudų. Apdirbant šio tipo paviršius tradiciniais būdais, paveikiama tik detalės geometrija be galimybės modifikuoti apdorojamą paviršių.

Darbo aktualumas

Pastaruoju metu griežtinami reikalavimai pramonėje naudojamų įrenginių, automobilių, žemės ūkio technikos ir kt. sukeliama taršai. Siekiant atitikti šiuos reikalavimus būtina optimizuoti gamybos procesus, sumažinti remonto darbų laiko sąnaudas. Todėl šiuo metu yra labai didelis sparčių, ekonomiškai efektyvių gamybos ir paviršinio metalo sluoksnio apdorojimo ir modifikavimo technologijų poreikis.

Šio darbo idėja – ištirti sukepintų SLS būdu gaminių paskesnio lazerinio mikroapdorojimo galimybę ir nustatyti paviršinio sluoksnio lazerinio modifikavimo poveikį sluoksnio formavimosi procesui ir jo fizikinėms savybėms. Remiantis literatūros analize galima teigti, kad galutinis paviršiaus modifikavimas lazeriu leistų išvengti trūkumų, kurie būdingi tradicinei SLS technologijai (paviršiaus nelygumas ir didelės užlaidos mechaniniam apdorojimui iki 1 mm), bei pagerinti metalinio sukepinto gaminio eksploatacines savybes. Galimybė lazerio spindulio pluoštą sukoncentruoti į mažo skersmens dėmę leidžia gauti plonus modifikuoto metalo sluoksnius, kurių storis siekia 0,01–0,3 mm. Trumpa proceso trukmė ir tiksliai dozuotas energijos įvedimas užtikrina minimalią terminio poveikio sritį ir minimalias deformacijas.

Sukepintų gaminių paviršiaus lazerinio modifikavimo proceso tyrimas suteiks naujų žinių apie geležies-nikelio-kobalto metalo paviršinio sluoksnio formavimosi procesą. Gautos žinios suteiks galimybę nustatyti lazerinio modifikavimo ir jo technologinių parametrų įtaką sukepintam gaminiui. Tai leis pagerinti tokių gaminių atsparumą dilimui ir korozijai, sumažinti jų paviršiaus šiurkštumą, sumažinti gaminio kainą ir padidinti resursą.

Tyrimo objektas

Selektyviuoju lazeriniu sukepinimo būdu pagaminti bei lazeriu papildomai apdoroti geležies-nikelio-kobalto pagrindo paviršiai.

Darbo tikslas

Nustatyti gaminių, sukeptų SLS būdu, paviršinio sluoksnio lazerinio mikroapdoravimo proceso įtaką sluoksnio formavimosi procesui ir jo mechaninėms, tribologinėms bei eksploatacinėms savybėms.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Ištirti lazerinio mikroapdoravimo technologinių parametrų (lazerio spindulio pluošto galios, apdirbimo greičio, ėjimų skaičiaus) poveikį sukeptų SLS sluoksnių morfologijai, topografijai, mechaninėms, tribologinėms ir eksploatacinėms savybėms.
2. Nustatyti optimalius lazerinio mikroapdoravimo technologinius parametrus, siekiant gauti geresnių eksploatacinių savybių (lyginant su vien tik sukeptu sluoksniu) daugiafunkcij Fe-Ni-Co pagrindo paviršių.

Tyrimų metodika

Disertacijoje taikomi analitiniai ir eksperimentiniai tyrimo metodai.

Darbe tirta lazerinio mikroapdoravimo proceso įtaka gaminių, sukeptų SLS būdu, paviršinio sluoksnio formavimosi procesui ir jo mechaninėms, tribologinėms bei eksploatacinėms savybėms. Bandymams buvo naudoti Fe-Ni-Co miltelių pagrindu sukepti bandiniai, papildomai apdoroti koncentruotosios energijos šaltiniu. Fe-Ni-Co miltelių savybės tirtos naudojant skenuojamąją elektroninę mikroskopiją, rentgeno mikroanalizę bei rentgeno spindulių difrakciją. Vien tik sukeptų ir papildomai lazerio spinduliuote apdorotų bandinių mikrostruktūra ir fazės tirtos taikant šiuolaikinius medžiagų tyrimo metodus: skenuojamąją elektroninę mikroskopiją, rentgeno mikroanalizę, rentgeno spindulių difrakciją. Mechaninės, tribologinės ir eksploatacinės sukeptų ir sukeptų bei

papildomai lazeriu apdorotų bandinių paviršių savybės tirtos atliekant kietumo, dilimo, atsparumo korozijai ir profilometrijos bandymus.

Darbo mokslinis naujumas

SLS technologija yra labai perspektyvi energetikos įrenginių, automobilių, lėktuvų, kosmoso, spaudos, medicinos ir kitose srityse. Gaminant sudėtingos formos konstrukcines detales, gamyboje plačiai naudojamas selektyvusis lazerinis sukepimas.

Eksperimentinių tyrimų metu nustatyti optimalūs sukepintų Fe-Ni-Co miltelių pagrindu gaminių papildomo mikrolazerinio apdorojimo parametrai. Tyrimais patvirtinta, kad SLS sukepintų gaminių papildomas lazerinis mikroapdorojimas užtikrina naujo, tankesnio sukepinto paviršinio metalo sluoksnio formavimosi procesą, geresnę topografiją, didesnę kietumą ir geresnę atsparumą dilimui. Rengiant disertaciją, gauti šie medžiagų inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Fe-Ni-Co miltelių pagrindu sukepintų SLS būdu gaminių papildomo lazerinio mikroapdorojimo technologija leidžia sukurti daugiafunkcij sluoksnį sukepinto bandinio paviršiuje, kuris pasižymi geresnėmis mechaninėmis, tribologinėmis ir eksploatacinėmis savybėmis.
2. Nustatytos SLS būdu sukepinto ir nanosekundinės veikos lazeriu apdoroto paviršinio sluoksnio morfologijos, topografijos, fazinės sudėties, mechaninių, tribologinių ir antikorozinių savybių sąsajos su lazeriniu apdorojimu ir jo parametrais, leidžiančios parinkti optimalius apdorojimo režimo parametrus konkrečioms eksploatacinėms sąlygoms.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Fe-Ni-Co miltelių pagrindu SLS būdu sukepintų gaminių papildomo lazerinio mikroapdorojimo technologija gali būti pritaikyta pramonės srityse, kuriose plačiai naudojami labai svarbūs, sudėtingos geometrijos gaminiai (polimerų liejimo formos, variklių ir turbinų detalės ir kt.).

Ginamasis teiginys

SLS sukepintų Fe-Ni-Co miltelių pagrindo gaminių papildomo lazerinio mikroapdorojimo aukštas apdorojimo tikslumas, tikslus energijos įvedimas, trumpas apdoroto sluoksnio formavimo laikas lemia naujo sukepinto paviršinio metalo modifikuoto sluoksnio formavimą ir užtikrina geresnę paviršiaus topografiją, didesnę kietumą ir atsparumą dilimui.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra išspausdinti 8 moksliniai straipsniai: 4 – tarptautinėse duomenų bazėse esančiuose recenzuojamuose mokslo žurnaluose, 4 – kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai paskelbti dešimtyje mokslinių konferencijų Lietuvoje ir užsienyje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ 2011 ir 2014 m. Vilniuje.
- Tarptautinėje konferencijoje „Mechatronic Systems and Materials“ 2013 m. Vilniuje ir 2015 m. Kaune.
- Tarptautinėje konferencijoje „Advanced Materials and Technologies“ 2013 m. Palangoje.
- Tarptautinėje konferencijoje „The prospects of using functional coatings“ 2015 m. Karagandoje.
- Tarptautinėje konferencijoje „New materials and technologies: Powder metallurgy, Composite materials, Protective coatings, Welding“ 2016 m. Minske.
- Tarptautinėje konferencijoje „Modern methods and technologies for the creation and processing of materials“ 2015 ir 2016 m. Minske;
- Tarptautinėje konferencijoje „Science integration, education and production – basis of the implementation of the Plan of the nation: Saginov’s readings № 9“ 2017 m. Karagandoje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados. Taip pat yra 5 priedai.

Darbo apimtis yra 106 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 6 numeruotos formulės, 53 paveikslai ir 13 lentelių. Rašant disertaciją, panaudoti 109 literatūros šaltiniai.

Adityviosios gamybos ir metalinių paviršių modifikavimo ypatumų analizė

Skyriuje pateikiama kompleksinė adityviosios gamybos ir dalinė tradicinių plieno apdorojimo būdų analizė. Nagrinėjami metalinių paviršių fizikiniai lazerinio mikroapdorojimo technologijos ypatumai.

Skyriaus tematika paskelbti trys autoriaus (su bendraautoriais) straipsniai (Markovič *et al.* 2013a; Markovič *et al.* 2013b; Vaitkūnaitė *et al.* 2014).

1.1. Adityvioji gamyba

1.1.1. Adityviosios gamybos plėtra

Adityvioji gamyba – tai technologija, kurią taikant galima gaminti erdvinis tūrius su įvairialype vidine struktūra ir plačiu kokybinių charakteristikų spektru. (Olahanmi *et al.* 2015). Pagrindinis AG principas yra gaminio erdvinio modelio (sukurto su CAD sistema) gamyba be jokios išankstinės apdorojimo technologijų sekos kūrimo. Esminis AG privalumas yra tai, kad detalė, gaminys, tūris ir kt. kuriami naudojant tik gaminio CAD modelį (Mishra *et al.* 2015). Tradicinės

gamybos atveju tai yra neįmanoma, nes būtina išanalizuoti daugybę technologinių žingsnių bei jų seką, gamybos įrenginių tinkamumą vienai ar kitai operacijai, žaliavų parinkimą, įrankių nomenklatūrą bei apdorojimą atliekančio personalo kvalifikacijos lygį (Kumar *et al.* 2007). AG šiuo požiūriu reikalauja tik gaminio matmenų, paviršinio technologijos proceso supratimo bei žaliavos. Tokiu būdu gerokai sumažinami apdorojimo kaštai, operacijų, reikalingų detalei apdirbti, skaičius, gamybos laikas (Paulic *et al.* 2014).

Daugelis mokslininkų AG apibrėžia kaip revoliuciją apdorojimo pramonėje. Kai kurie netgi teigia, kad tokio tradicinio apdorojimo, kokį mes žinome, ateityje nebeliks (Bauereiss *et al.* 2014).

Daugeliu atvejų, siekiant pagerinti detalių, mazgų ar įrenginių eksploatacines charakteristikas, jų viduje būtina suformuoti sudėtingas aušinimo, tepimo ar oro kanalų sistemas taip, kad nebūtų pažeista ir pakeista išorinė gaminio forma (Manzirov *et al.* 2017).

AG technologijos pagrindą sudaro erdvinio tūrio priauginimas sluoksnis po sluoksnio (Chavoshi *et al.* 2016). Kiekvienas sluoksnis yra skersinis detalės pjūvis, sukurtas naudojant CAD modelį. Visi AG įrenginiai naudoja tą patį veikimo principą. Jie skiriasi tik naudojamomis medžiagomis, pavienių tūrio sluoksnių paskirstymu darbo zonoje bei miltelių tarpusavio sujungimo būdu (Balachninaite *et al.* 2008). AG technologija gali būti taikoma ne tik prototipų, bet ir sudėtingų bei atsakingų gaminių gamyboje. AG technologija yra daugialypė sistema, kurioje technologinių veiksmų seka priklauso nuo gaminamos detalės sudėtingumo bei kompleksškumo. Kai AG yra naudojama kartu su kitomis technologijomis, formuojant gamybinių procesų seką, užtikrinamas trumpesnis gaminio gamybos laikas bei mažesni kaštai (Chavoshi *et al.* 2016). Šia hibridine technologija gaunamas visavertis galutinis produktas, kuriam netaikomi geometriniai apribojimai (Huang *et al.* 2016).

AG sudaro šie etapai (Gibson *et al.* 2013):

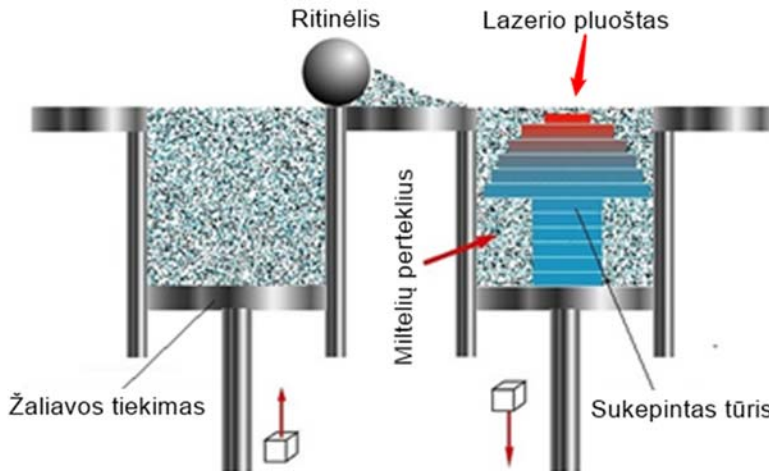
- Erdvinio modelio projektavimas. Visų AG detalių gamyba prasideda nuo erdvinio modelio projektavimo, kuris atspindi gaminio geometriją. Šis procesas gali būti atliktas su dauguma šiuolaikiniam pasauliui žinomų grafinių programų (Olanmi *et al.* 2015).
- Erdvinio modelio konvertavimas į STL formatą. AG įrenginiai dirba tik STL duomenų formatu. Beveik visa žinoma CAD programinė įranga palaiko šį formatą. Tokiu būdu paruošti duomenys leidžia sudaryti gaminio gamybos procesą.
- Erdvinio modelio perkėlimas į AG įrenginį. Skaitinis STL modelis privalo būti perkeltas į AG įrenginį. Čia atliekama bendra erdvinio modelio patikra: gabaritinių matmenų, geometrijos ir kt. (Paul *et al.* 2012).

- Technologinių procesų parametų nustatymas. Siekiant užtikrinti gamybos proceso našumą, prieš darbo pradžią atliekamas šių technologinių parametų optimizavimas: lazerio spindulio pluošto galios, sukepinamo sluoksnio storio, lazerio poveikio laiko, apdorojimo greičio ir kt. (Farahmand *et al.* 2014).
- Gamyba. Automatizuotas procesas, nereikalaujantis nuolatinės profesionalios priežiūros. Tačiau minimalus monitoringas, siekiant įsitikinti, kad įrenginys veikia tinkamai, yra rekomenduojamas. Šiuo atveju stebimi tik šie technologiniai sutrikimai: elektros dingimas, žaliavos stygius, mechaninis gedimas.
- Papildomas apdorojimas. AG būdu pagamintos detalės neretai turi būti papildomai apdorotos rankiniu arba mašininiu būdu, siekiant užtikrinti gaminio atitiktį aukštiesiems kokybės reikalavimams (Zhu *et al.* 2016). AG pagamintų tūrių metalas nepasižymi kietumu, tačiau savaime aišku, kad papildomas terminis apdorojimas yra būtinas, jei to reikalauja gaminio techninės charakteristikos. Liauno, nestandaus arba mažagabaričio gaminio atveju stabiliam AG procesui užtikrinti būtinos papildomos technologinės bazės, kurias privalu pašalinti procesui pasibaigus. Būtina pabrėžti, kad papildomas apdorojimas reikalauja kvalifikuoto ir labai patyrusio personalo, kadangi AG gaminių apdorojimas ne tik imlus laiko atžvilgiu, bet ir labai specifinis procesas, reikalaujantis kruopštumo, susikaupimo ir neeilinių gebėjimų. Papildomi technologiniai veiksmai, naudojami AG produktams apdirbti, yra šios disertacijos tyrimų tikslas.
- Gaminio pritaikymas. Atskirais atvejais reikalaujamas papildomas išorinių paviršių dekoravimas, pvz.: gruntavimas, dažymas. Dažnai AG produktus būtina surinkti į mazgus ar mechanizmus, norint įvertinti jų funkcionalumą ir estetinį vaizdą. (Manzirov *et al.* 2017). Būtina pabrėžti, kad žaliavai keliami aukšti kokybės reikalavimai. Daugeliu atvejų tai įvairios formos ir sudėties milteliai. Jų sandėliavimo, saugojimo sąlygos yra griežtai apibrėžtos, siekiant eliminuoti jų chemines reakcijas su išoriniais veiksniais. AG neretai naudojamos antrinės žaliavos. Šio tipo žaliavoms labai svarbu užtikrinti pradinę kontrolę, nes pakartotinis perdirbimas gali lemti žaliavos kokybės rodiklių pablogėjimą ir tuo pačiu turėti įtakos gaminio kokybei.

1.1.2. Selektivusis lazerinis sukepinimas

Selektivusis lazerinis sukepinimas – tai AG technologijų grupei priklausantis procesas (1.1 pav.). Kurio dėka galima itin sudėtingos geometrinės formos ir kompleksinių technologinių sprendimų detalių, mazgų ir įrenginių gamyba (Chavoshi *et al.* 2016). Literatūroje SLS apibūdinamas kaip tam tikros geomet-

rinės formos tūrio gamyba žingsnis po žingsnio arba sluoksnis po sluoksniu (Chavoshi *et al.* 2016; Manzirov *et al.* 2017; Merklein *et al.* 2016; Newman *et al.* 2015; Shukla *et al.* 2016; Hu *et al.* 2011).



1.1 pav. Selektinio lazerinio sukepinimo procesas (Kemplon engineering)

Fig. 1.1. The process of the selective laser sintering

Pastaruoju metu medžiagų sintezė bei jų apdorojimo metodai tampa aktualiu klausimu medžiagų raidos srityje, todėl sukepinimo technologija ir jos tobulinimas yra pagrindinis uždavinys sprendžiant šį klausimą. Nepaisant to, kad sukepinimo procesas žinomas nuo Kristaus laikų, tačiau išsamus šio reiškinio tyrimas pradėtas tik 1940 metais (Olakanmi *et al.* 2015). Pagrindinis šios technologijos privalumas yra tai, kad sukepinimo būdu tarpusavyje galima sujungti praktiškai visų rūšių medžiagas. Prieš pradedant gamybą, kaip ir kiekvieno inžinerinio proceso metu, būtina visapusiškai išnagrinėti būsimam gaminiui keliamus reikalavimus.

Pagrindinis sukepinimo tikslas – pagaminti tam tikros geometrijos tūrį su pageidaujamomis morfologinėmis ir topografinėmis charakteristikomis, keičiant proceso technologinius parametrus bei turint galimybę atkartoti arba pagaminti naują, tokį patį tūrį (Paul *et al.* 2012).

Bendru atveju sukepinimas skirstomas į kietos ir skystos fazės sukepinimą.

Kietos fazės sukepinimas vyksta tada, kai miltelinio pagrindo medžiaga sukepinama nesant skystos fazės (Manzirov 2017). Tai yra neviršijant miltelių medžiagos lydymosi temperatūros. Skystos fazės sukepinimo atveju proceso temperatūra yra didesnė nei sukepinamos medžiagos lydymosi temperatūra (Ba-

lachninaitė *et al.* 2008). Esant skystos fazės sukepinimo atvejui, gaunamas kokybiškesnis gaminys negu esant kietos fazės sukepinimui (Merklein *et al.* 2016).

Sukepinimo proceso kokybei įtakos turintys kintamieji parametrai skirstomi į dvi pagrindines kategorijas:

- žaliavos;
- technologiniai proceso parametrai.

Kintamieji parametrai, turintys įtakos sukepinimo procesui, priskiriami žaliavų kategorijai:

- miltelių cheminė sudėtis;
- miltelių frakcijos dydis;
- miltelių geometrinė forma;
- miltelių sulipimo ir išsimaišymo laipsnis.

Šie kintamieji parametrai veikia miltelių sukepinimą, spūdumą, grūdelių augimo greitį ir jų plastines savybes (Merklein *et al.* 2016).

Sukepinimas neįmanomas be aukštos kokybės žaliavos. Yra keli medžiagų mechaninio smulkinimo būdai, tačiau labiausiai paplitę šie malūnai: rutuliniai, planetariniai, išcentriniai, vibraciniai, atritoriniai ir kt. (Valiulis 2005).

Tokiu atveju, jei žaliava sudaryta iš dviejų ir daugiau rūšių miltelių, sukepinamos žaliavos homogeniškumas arba, kitaip sakant, išsimaišymo laipsnis turi didelę įtaką. Siekiant užtikrinti žaliavos homogeniškumą naudojamas ne tik mechaninis miltelių malimas, bet ir cheminiai procesai (Farahmand *et al.* 2016).

Kintamieji parametrai, priskiriami technologinių procesų kategorijai, apima šias sritis:

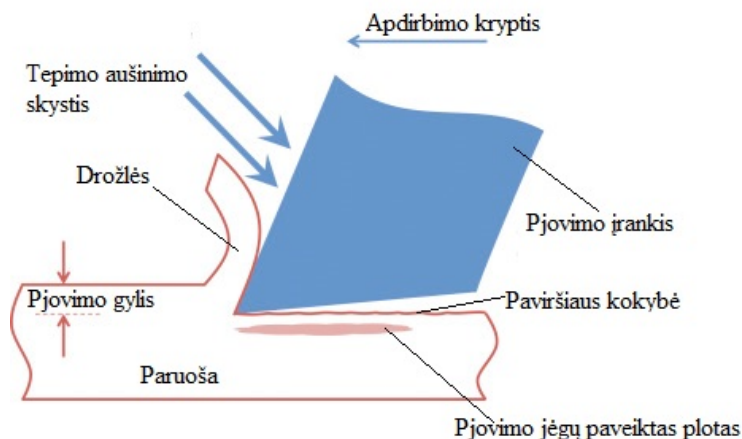
- proceso temperatūrą;
- atmosferos slėgį;
- kaitinimo ir aušinimo greitį.

1.2. Tradicinių metalinių paviršių apdorojimo būdų apžvalga

Siekiant nustatyti pagrindinius skirtumus tarp tradicinių ir inovatyvių metalinių paviršių apdorojimo būdų, būtina nuodugniai išanalizuoti tradicinių metalinių paviršių apdorojimo būdų ypatumus. Atsižvelgiant į tai, kad lazerinio apdorojimo metu galimas ne tik geometrinių, bet ir mechaninių, fizikinių ir cheminių apdirbamojo paviršiaus charakteristikų pokytis, būtina suprasti, koku būdu pasiekiamas analogiškas rezultatas taikant tradicinius apdorojimo būdus. Toliau pateikiama populiariausių metalinių paviršių apdorojimo būdų apžvalga.

Taikant įvairius pjovimo metodus, nuo ruošinio nuimamas tam tikro storio medžiagos sluoksnis (1.2 pav.), tuo pačiu gaunama reikiamos formos ir matmenų detalė (Binder *et al.* 2017). Pjovimo įrankis – tai metalo pjovimo staklių da-

lis, tiesiogiai pjaunanti ruošinį, iš kurio turi būti pagaminta detalė (Cui *et al.* 2017). Pjaunamas metalas gniuždomas, tempiamas, vyksta šlytis, susidaro didelė trintis, išsiskiria daug šilumos (Rodriguez *et al.* 2017).



1.2 pav. Metalų apdorojimas pjovimu (Slide player)

Fig. 1.2. Steel processing by cutting

Frezavimas – tai labai našus ir plačiai taikomas metalo ir kitokių konstrukcinių medžiagų apdorojimo daugiaašmeniais pjovimo įrankiais būdas. Įvairių tipų frezomis formuojami detalių plokšti, laiptuoti paviršiai, grioveliai, kontūriniai, reljefiniai ir fasoniniai paviršiai. Tačiau frezavimo proceso trūkumas yra tas, kad frezos dantys pjauna kintamo skerspjūvio drožlės, įrankio briauna iš pradžių slysta pjovimo paviršiumi jį sukietindama ir šiurkštindama. Todėl frezuojant poveikio jėgos yra pulsuojančios, atsiranda sunkiai panaikinamų vibracijų, kurios didina apdirbamojo paviršiaus šiurkštumą ir sunkina pjovimą (Binder *et al.* 2017).

Gręžimas – tai vienas labiausiai paplitusių ir seniausių metalo pjovimo būdų kiauroms ir akloms skylėms formuoti (Abouridouane *et al.* 2017). Pjovimo įrankiai yra grąžtai. Jais gręžiamos skylės ištisiniam metalo arba pakartotinai gręžiamos didinant anksčiau išgręžtų skylių skersmenis (Smolenicki *et al.* 2012).

Gręžiant spiraliniais grąžtais, kurių skersmuo didesnis kaip 15 mm, gaunamos 11–12 kvaliteto tikslumo skylės, o apdirbto paviršiaus šiurkštumas iki $R_z = 10\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$. Gręžiant mažesnio kaip 15 mm skersmens grąžtais, yra pasiekiamas iki 8 kvaliteto skylės tikslumas ir iki $R_a = 1,25\text{--}2,5\text{ }\mu\text{m}$ paviršiaus šiurkštumas (Parsian *et al.* 2017).

Šlifavimo abrazyviniais diskais operacijos plačiai taikomos metalui ir kitoms konstrukcinėms medžiagoms apdirbti, kai reikia gauti didelio tikslumo (iki

4-ojo kokybės) ir mažo paviršiaus šiurkštumo (iki R_a 0,04 μm) detales (Ivanova 2016). Be to, šlifavimo būdu detalės gali būti rupiai apdirbamos, nuvalomi liejimo, kalimo, frezavimo, tekinimo bei suvirinimo siūlių nelygumai, pjaunamos labai kietos medžiagos (virš 60 HRC), galandami įvairūs įrankiai (Silva *et al.* 2017).

Šlifavimas yra daug sudėtingesnis už tekinimą, gręžimą, frezavimą ir kitus pjovimo būdus. Šlifavimo diskas yra daugiaašmenis pjovimo įrankis, sudarytas iš daugybės rišančiąja medžiaga sujungtų pjovimo elementų, kurie būna netaisyklingos daugiabriaunės formos su aštriomis arba suapvalintomis briaunelėmis (Silva *et al.* 2017). Sukantis diskui, abrazyviniai grūdėliai dideliu greičiu pjauna daugybę smulkių netaisyklingos formos droželių. Abrazyviniai grūdėliai pjauna metalą sunkiomis sąlygomis, nes daugumos jų pjovimo briaunelės yra suapvalintos, netaisyklingos formos, su neigiamais priekiniais kampais (Ding *et al.* 2016). Dėl netobulos ir atsitiktinės pjaunančiųjų grūdelių formos negalima reguliuoti pjovimo proceso, o tuo pačiu prognozuoti apdorojimo kokybės.

Elektrokibirkštinio tūrinės erozijos apdorojimo pagrindą sudaro termoelektarinės energijos panaudojimas medžiagos tūriui išlydyti arba pašalinti. Valdant aukšto dažnio elektros iškrovą, apdirbami sudėtingi fasoniniai, reljefiniai išoriniai ir vidiniai paviršiai.

Elektrokibirkštinio apdorojimo metu tarpelis tarp į dielektrinį skystį panardintos detalės bei elektrodo siekia nuo 0,01 iki 0,5 mm. Iškrovai suformuoti naudojama įtampa, priklausanti nuo tarpelio bei dielektrinio skysčio savybių. Medžiagos apdorojimas vyksta dėl elektros srovės tarp elektrodo ir detalės, dėl kurios vyksta metalo dalelių erozija.

Siekiant apibendrinti technologijos pasirinkimo kriterijus, būtina atlikti adityviosios gamybos ir tradicinio apdorojimo palyginimą (1.1 lentelė).

1.1 lentelė. Adityviosios gamybos ir tradicinio apdorojimo palyginimas

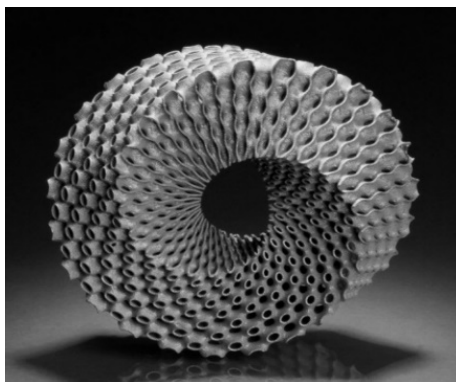
Table 1.1. The comparison between additive manufacturing and traditional processing

Parametro pavadinimas	Adityvioji gamyba	Tradicionis apdorojimas	Pastaba
Žaliavos tipas	Milteliai	Kietas kūnas	Milteliams, kaip žaliavai, keliama aukštesnė kokybės reikalavimai
Apdorojimo sparta	2 cm ³ / 3600 s	iki 1 cm ³ / 5 s	Tradicionio apdorojimo spartą lemia daugelis veiksnių

1.1 lentelės pabaiga

Parametro pavadinimas	Adityvioji gamyba	Tradicinis apdorojimas	Pastaba
Technologinių operacijų seka	Elementari	Sudėtinga	Tradicinis apdorojimas reikalauja daugiau technologinių žinių
Kompleksiškumas	Aukštas	Žemas	Tradicinis apdorojimas neleidžia modifikuoti apdirbamo paviršiaus
Tikslumas	$\pm 0,05$ mm	$\pm 0,002$ mm	
Geometriniai apribojimai	Nėra	Daug	Žiūrėti 1.3 paveiksle.
Programavimas	Elementarus	Sudėtingas	

Lyginant AG ir tradicinių metalinių medžiagų apdorojimo būdus, galima teigti, kad didžiausias AG technologijos pranašumas atsiranda sudėtingos geometrijos gaminių gamybos metu. Tradicinio apdorojimo atveju našus apdorojimas galimas tik esant paprastai gaminio geometrijai: cilindras, plokštuma, kūgis, sfera ir kt. Kūno, pavaizduoto 1.3 paveiksle apdorojimas tradiciniu būdu įmanomas tik keičiant detalės padėtį staklėse. Tai lemia geometrinių parametrų tikslumą ir gamybos laiką.



1.3 pav. Sudėtingos geometrinės formos gaminy (3d maastricht)

Fig. 1.3. The part with difficult shape

1.3. Inovatyviųjų metalinių paviršių apdorojimo būdų apžvalga

1.3.1. Apdorojimas lazerio spindulio pluoštu

Šiandien lazeriai taikomi ne tik praktikoje, bet ir buityje. Jie naudojami ruošiniams pjauti ir suvirinti laivininkystėje, automobilių pramonėje, medicinoje, apšvietimo technikoje, metrologijoje, medžiagų inžinerijoje, elektronikoje, mikroinžinerijoje (Balachninaite *et al.* 2008).

Lazerinio paviršių apdorojimo panaudojimas pramonėje didėja dėl šių lazerinės technologijos savybių (Mishra *et al.* 2015):

- Lokalus terminis poveikis. Lazerinio apdorojimo proceso našumas priklauso nuo šiluminių ir fizikinių apdorojamo kūno charakteristikų. Traipios ir kietos detalės gali būti sėkmingai apdorojamos lazeriniu būdu.
- Proceso lankstumas. Lazerinis apdorojimas pasižymi proceso lankstumu. Šiuo atveju vienu metu galima vykdyti skirtingus medžiagos apdorojimo būdus: pjovimą, suvirinimą, gręžimą, grūdinimą, atleidimą, normalizavimą, atkaitinimą ir kt.
- Neinvazinis apdorojimas. Vibracija, drožlės, abrazyvo dalelės – šie reiškiniai yra pašalinami lazerinio apdorojimo metu (Lombardo *et al.* 2017).
- Ekonominis efektyvumas. Lazerinis apdorojimas, lyginant su tradicine gamyba yra efektyvesnis, universalesnis, turintis didesnę potencialą, mažiau imlus laiko sąnaudoms (Manzirov 2017).

Vertinant šiuos esminius bruožus, akivaizdu, kad šis inovatyvus procesas ekonominiu požiūriu nepalyginamai efektyvesnis.

1.3.2. Medžiagų mikroapdorojimas lazeriu spindulio pluoštu

Apdirbamo kūno paviršiaus kaitinimas atsiranda dėl lazerinės spinduliuotės savybių. Keičiant lazerinės spinduliuotės energetinius parametrus, gaunami skirtingi lazerinio apdorojimo procesai (Balachninaite *et al.* 2008). Apdorojimas lazeriu dėl labai mažo terminio poveikio lauko bei aukšto tikslumo apibūdinamas kaip mikrolazerinis apdorojimas.

Vienas labiausiai paplitusių ir perspektyviausių lazerinio apdorojimo būdų yra suketinimas. Šiuo būdu galima suketinti detalių paviršius, ypač tada, kai reikalingas lokalus poveikis. Šiuo būdu taip pat galima keisti suketinamo sluoksnio gylį, nekeičiant detalės geometrinių matmenų. Tai ypač svarbu tikslių prietaisų ir mechanizmų gamyboje (Kumar *et al.* 2009).

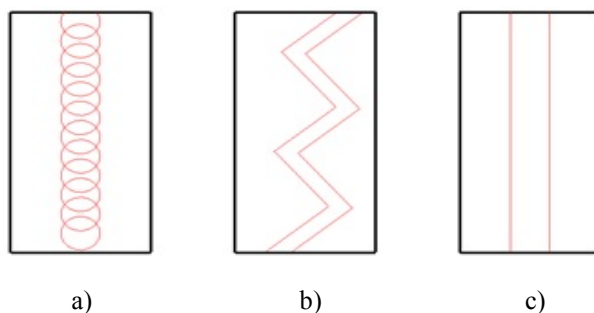
Suketinto medžiagos sluoksnio storis, plotis, kietumas ir kt. daugiausia priklauso nuo (Gu *et al.* 2009):

- spinduliuotės energetinių parametrų;
- fizikinių medžiagos charakteristikų;
- apdirbamo kūno gabaritinių matmenų;
- apdorojimo greičio.

Sukietintas sluoksnis paprastai būna ne storesnis kaip 2 mm. Naudojant šią technologiją, brangų legiruotąjį plieną galima pakeisti angliniu. Šiluminio poveikio intensyvumas gali būti keičiamas plačiose ribose, reguliuojant įkaitinimo, aušinimo greičius bei poveikio laiką. Tokiu būdu galima gauti reikiamą detalės struktūrą ir savybes (Ulkar *et al.* 2010). Technologinės lazerinio sukietinimo galimybės leidžia naudoti šį procesą kaip baigiamąją operaciją be tolesnio mechaninio apdorojimo. Be to, tam tikras surinkto mechanizmo ar mazgo vietas galima sukietinti surinkus konstrukciją ar atskirą mazgą (Jiang *et al.* 2005).

Lazerinis paviršių kietinimas paprastai atliekamas pagal tris schemas (1.4 pav.) (Balachninaite *et al.* 2008):

1. Naudojami impulsinės veikos lazeriai. Paviršinio sluoksnio apdorojimas atliekamas pagal 1.4 paveiksle pateiktą impulsinio apdorojimo schemą.
2. Naudojami nuolatinės veikos lazeriai. Paviršinio sluoksnio apdorojimas atliekamas pagal 1.4 paveiksle pateiktą apdorojimo zigzagu schemą.
3. Naudojami nuolatinės veikos, didelės galios lazeriai. Paviršinio sluoksnio apdorojimas atliekamas pagal 1.4 paveiksle pateiktą tiesialinijinio apdorojimo schemą.



1.4 pav. Lazerinio sukietinimo schema: a) impulsinio apdorojimo; b) apdorojimo zigzagu; c) tiesialinijinio apdorojimo

Fig. 1.4. Scheme of laser treatment: a) impulse processing; b) zigzag processing; c) rectilinear processing

Lazerio spinduliuote suketintas metalo sluoksnis susideda iš trijų būdingų mechaninio kietumo sričių (Kumar *et al.* 2007):

- Pirmoji sritis – tai suketintas paviršiaus sluoksnis, kuris maždaug 0,03–0,08 mm gylyje yra šiek tiek minkštesnis (atsileidęs) negu giliau esantis.
- Antroji sritis yra didžiausio metalo kietumo sritis. Didėjant atstumui nuo gaminio paviršiaus, metalo kietumas laipsniškai mažėja ir pasiekia dydį, mažesnę už kritinį, t. y. mažesnę už pagrindinio metalo kietumą, kai grūdinama tūriniu būdu.
- Trečioji sritis – jos kietumas yra mažesnis dėl to, kad lėtai sklindant šilumai į gilesnius sluoksnius, užgrūdintas metalas atsileidžia.

Suketinimas impulsinio technologinio lazerio spinduliuote yra palyginti lėtas procesas ir daugiausia naudojamas smulkių detalių ir mažų matmenų įrankių paviršiams apdirbti. Šio proceso našumas nedidelis, nes tokių technologinių lazerių impulsų pasikartojimo dažnis paprastai ne didesnis kaip 30 Hz (Jiang *et al.* 2005).

Gerokai efektyviau suketinama nuolatinės veikos lazeriais. Jais gaunamas storesnis ir tolygesnis suketintas sluoksnis, o procesas vyksta 2–4 kartus greičiau negu suketinant impulsiniais lazeriais (Jiang *et al.* 2005).

Lazeriu suketinto metalo paviršius dėl terminio poveikio iš dalies oksiduojasi ir yra tamsesnės spalvos negu paviršius, nepaveiktas lazerio spinduliuotės. Lazerio spinduliuote suketintas sluoksnis yra ryškiai matomas detalės paviršiuje. Einant gilyn, metalo struktūra iš smulkiagrūdės pamažu pereina į pradinę struktūrą. Toks lazerio spinduliuote suketintas sluoksnis, laipsniškai pereinantis į pradinę struktūrą, yra gerai sukibęs ir eksploatuojant labai patvarus (Murthy *et al.* 2011).

Smūginis kietinimas. Šiuolaikiniai lazeriai leidžia gauti labai didelio intensyvumo 10^{10} – 10^{12} W/cm² ir mažos trukmės 10^{-8} – 10^{-14} s impulsus. Impulso trukmė priartėja prie relaksacijos laiko 10^{-9} – 10^{-11} s. Dėl to lazerio spinduliuotės šiluminė energija nespėja giliau įsiskverbti į pagrindinį metalą. Labai didelė energijos koncentracija paviršinio sluoksnio mikrotūryje sukelia medžiagos plazminę būseną (Sovizi *et al.* 2005). Susidarant plazmai, kyla didelis slėgis ir gali susiformuoti, kaip ir sprogo atveju, smūginė banga. Iš esmės lazerio poveikis apdirbamam paviršiui yra labiau mechaninis nei terminis. Smūginė banga susiformuoja tik tada, jeigu lazerio spinduliuotės poveikio trukmė trumpesnė už smūginės bangos sklidimo laiką (Zhang *et al.* 2007).

Apdirbamą paviršių veikiantis mechaninio poveikio impulsas kyla medžiagai staigiai pereinant į plazminę būseną ir išgaruojant į aplinką. Taigi, išgaruojant medžiagai, paviršiaus plotą veikia mechaninis impulsas (Zhang *et al.* 2007).

Vienu metu veikiant ir smūgio bangai, ir mechaniniam impulsui, paviršiuje susidaro kūgio formos įduba.

Pagrindinis paviršių smūginio kietinimo trūkumas – paviršiuje susidaro įdubų, kurios pablogina apdirbamo paviršiaus kokybę.

Grūdinimas. Vienas iš esminių paviršių apdorojimo lazerio spindulio pluoštu pranašumų – labai staigus, lokalus paviršiaus įkaitinimas su paskesniu greitu aušinimu. Šis metodas labai efektyviai taikomas paviršiams grūdinti (Romano *et al.* 2015). Kadangi grūdinamos detalės paviršius greitai įkaista ir greitai ataušta, jame susidaro smulkiagrūdžio martensito sluoksnis. Dėl susidariusių didelių terminių įtempių, plastiškai deformuojasi metalo kristalinė gardelė ir padidėja dislokacijų tankis. Dėl to paviršinis sluoksnis užsigrūdina ir tampa gerokai atsparesnis mechaniniam dilimui (Kumar *et al.* 2007). Metalo grūdinto sluoksnio kietumas ir storis yra susiję. Kuo daugiau metalas sugeria lazerio spinduliuotės, tuo gilesnis poveikis ir tuo kietesnis būna paviršinis sluoksnis (Romano *et al.* 2015). Didinant spinduliuotės intensyvumą, detalės paviršius gali pradėti lydytis.

Lazerio spinduliuote užgrūdintas paviršinis sluoksnis susideda iš keturių sričių (Gillner *et al.* 2005):

- Pagrindinio metalo srities.
- Atleidimo srities, kurios kietumas gerokai sumažėjęs, nes nebėra martensito.
- Terminio poveikio srities. Tai didžiausio kiečio martensitinės struktūros sritis, kartais gali susidaryti baltas sluoksnis. Apatinėje šios srities dalyje yra martensitinės ir feritinės struktūros grūdinimo zona.
- Išlydytos srities, kurios struktūra paprastai būna dendritiniai martensito kristalai. Tai užgrūdintas paviršinis sluoksnis, kuris maždaug 0,02–0,08 mm gylyje gali būti šiek tiek minkštesnis negu gilesnėje srityje.

Paviršių aplydymas. Lazerinis paviršiaus aplydymas atliekamas panašiu būdu kaip ir grūdinant, tik papildomai išlydomas paviršinis detalės sluoksnis. Lazerinio aplydymo metu apdirbamos detalės paviršiniame sluoksnyje vyksta sudėtingi procesai: skysto metalo zonoje stebimi aukšti temperatūros gradientai, o tai sukelia didelius paviršiaus įtempius bei skysto metalo konvekciją (Kumar *et al.* 2007). Paviršinio sluoksnio mikroreljefui didžiausią įtaką turi lazerinės spinduliuotės intensyvumas (Gu *et al.* 2009).

Paviršių legiravimas. Legiravimas lazeriu nuo lazerinio grūdinimo skiriasi tuo, kad keičiasi sukietinto paviršinio sluoksnio cheminė sudėtis.

Legiravimas lazeriu yra nesudėtingas ir spartus procesas. Detalės paviršius padengiamas legiruojamu elementu, miltelių sluoksniu arba įvairių rūšių pastomis. Lazerio veikiamas paviršius susilydo su legiruojamu sluoksniu, todėl legiravimo elementai difunduoja į pagrindinį metalą.

Ruošinys su plonu legiruojamu elementų sluoksniu juda tam tikru greičiu. Veikiamas lazerio spinduliuotės, paviršius lydosi ir legiravimo elementai patenka į skysto metalo vonią, kur vėliau kristalizuojasi. Legiravimo metu vyksta sudėtingi masės ir šilumos mainai bei mikrometalurginiai procesai (Gillner *et al.*

2005). Susidaro naujo lydinio sluoksnis, tvirtai sujungtas su pagrindinio metalo tūriu. Šio sluoksnio mikrostruktūra ir gylis iš esmės priklauso nuo spinduliuotės intensyvumo, poveikio trukmės ir svyruoja nuo 0,05 iki 2 mm (Murthy *et al.* 2011).

Tam, kad lazeriu legiruotas paviršius būtų lygus ir glotnus, reikia atlikti baigiamąją apdorojimo operaciją, pavyzdžiui, paviršių nušlifuoti. Lazerinio legiravimo metu reikia parinkti tikslius energetinius parametrus ir režimus, juos optimizuoti kiekvienam legiravimo elementui arba kelių legiravimo elementų mišiniui ir pagrindiniam metalui (Balachninaite *et al.* 2008). Nuo legiruojančiųjų elementų kiekio priklauso konstrukcinės medžiagos, gaminio, mazgo eksploatacinės ir kokybinės charakteristikos. 1-ame priede pateikiami dažniausiai naudojami elementai, skirti plienui legiruoti.

Gausiai legiruoti metalų lydiniai dažniausiai naudojami chemijos ir naftos pramonėje, energetikoje, medicinoje, aviacijoje, laivams statyti, mašinoms ir įrankiams gaminti, raketų ir atominei technikai.

Paviršių amorfinimas. Kai išlydytas paviršinis sluoksnis staigiai ataušinamas 10^5 – 10^8 K/s, kai kurių metalų klampumas tiek daug padidėja, kad nespėja susiformuoti metalo kristalizacijos centrai ir metalo paviršinis sluoksnis kietėdamas įgauna amorfinę struktūrą (Zhang *et al.* 2007). Amorfitam metalo paviršiniam sluoksniui būdingas netvarkingas atomų išdėstymas, jis pasižymi izotropiškumu. Medžiagos tinkamumas amorfizacijai priklauso nuo cheminės sudėties, aušinimo greičio, kristalizacijos centrų susiformavimo greičio ir kitų veiksnių (Gillner *et al.* 2005). Naudojant paviršių amorfinimo technologiją, gaunami feromagnetiniai lydiniai, turintys ypatingų magnetinių savybių. Jų koercityvinė jėga 10^4 kartų mažesnė nei esant įprastai kristalinei medžiagos struktūrai. Detalės, turinčios amorfinį paviršių, yra atsparios korozijai ir radioaktyviam poveikiui (Ulkar *et al.* 2010). Kadangi lazerio spindulio pluošto dėmė ant apdirbamo paviršiaus yra nedidelių matmenų, paviršiams amorfinti geriau tinka nuolatinės nei impulsinės veikos lazeriai (Zaeh *et al.* 2011).

Paviršiaus plakiravimas – tai paviršiaus, padengto specialia pasta, milteliais ar kietais komponentais, perlydymas, suteikiant jam specifinių savybių. Plakiravimo būdai skirstomi pagal tai, kaip į darbo zoną yra tiekama paviršių dengianti medžiaga (Bhaduri *et al.* 2016). Iš dengiamos medžiagos miltelių gali būti suformuojamas sluoksnis ant apdirbamo paviršiaus, kuris yra sulydomas lazeriu apsauginių dujų aplinkoje ir sudaro paviršių dengiantį sluoksnį. Dengiama medžiaga gali būti užtepama ant paviršiaus kaip pasta (rankiniu būdu arba automatizuotai) ir sulydoma lazeriu. Dengiama medžiaga taip pat gali būti automatiškai tiekama į lazerio poveikio zoną milteliais kartu su apsauginių dujų srautu (Chavoshi *et al.* 2017). Taip pat gali būti naudojama dengiamos medžiagos viela, kuri lazerio spindulio pluoštu išlydoma ant dengiamo paviršiaus.

Dengimas. Lazerinis paviršiaus dengimas (garų nusodinimas) dažniausiai atliekamas taip: lazerine spinduliuote išgarinamos dengimo medžiagos dalelės nusodinamos ant dengiamos medžiagos paviršiaus (Manzirov *et al.* 2017). Taip gaunamas specifinių savybių turintis paviršius (Gibson *et al.* 2015).

Taikant šį metodą, galima padengti tiek metalinius, tiek nemetalinius paviršius. Išgarinimo efektyvumui turi įtakos medžiagos laidumas šilumai, lazerinės spinduliuotės atspindžio koeficientas ir kt.

Lazerinis paviršių dengimas naudojamas, kai reikia ant dengiamo paviršiaus sudaryti plonas metalines plėveles, izoliacinės medžiagos sluoksnį arba kitokį specifinėmis savybėmis pasižymintį darinį (Manzirov *et al.* 2017). Garinant miltelius, pirmenybė suteikiama lazeriams, turintiems kuo trumpesnį bangos ilgį. Garinant nemetalinių medžiagų miltelius, dažniausiai naudojami CO₂ lazeriai (Gu *et al.* 2009).

Lazerinis paviršiaus valymas tai efektyvus būdas nešvarumams, nereikalingam medžiagos sluoksniui nuo gaminio paviršiaus šalinti, naudojant lazerio spinduliuotę. Taip valant nepažeidžiamas paviršius, neteršiama aplinka, sutau-poma vandens, kuris paprastai gausiai naudojamas, taikant tradicinius paviršiaus valymo metodus (Chavoshi *et al.* 2016). Lazerio spindulio pluoštas valomą paviršių paveikia tiesiogiai arba per šviesolaidį. Dažniausiai taikomi du paviršių lazerinio valymo metodai: sausasis ir šlapiasis (Zaeh *et al.* 2011).

1.4. Lazerio spindulio pluošto ir inžinerinių medžiagų sąveika

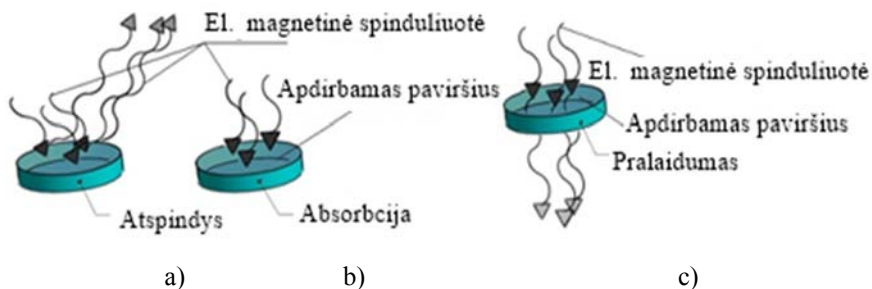
Nagrinėjant lazerinės spinduliuotės ir kietųjų kūnų sąveiką būtina įvertinti pagrindinius optinius reiškinius, svarbius atliekant lazerinį medžiagų apdorojimą. Lazerinės spinduliuotės banga krinta į kietojo kūno paviršių. Dalis krintančios spinduliuotės atsispindi nuo kietojo kūno paviršiaus, o kita spinduliuotės dalis patenka į kietąjį kūną (1.5 pav.) (Farahmand *et al.* 2014).

Jei kietasis kūnas spinduliuotę stipriai sugeria, galimas kūno kaitinimas, lydymas ir garinimas, o tai ir yra pagrindinės lazerinio mikroapdorojimo operacijos (Hu *et al.* 2011). Todėl norint įvertinti lazerinio mikroapdorojimo poveikį konkrečiai inžinerinei medžiagai, reikia įvertinti jos atspindį ir sugertį (Gibson *et al.* 2015).

Lazerio spindulio pluošto bangos atspindys nuo kietojo kūno paviršiaus apibūdinamas atspindžio koeficientu, kuris įvertina atspindėtos ir kritusios galių santykį. Norint apibūdinti kietojo kūno pralaidumą, įvedamas pralaidumo koeficientas, įvertinantis perėjusios ir kritusios galios santykį (Romano *et al.* 2015).

Medžiagos atspindžio koeficiento nustatymas lazerinio apdorojimo metu yra labai sudėtingas uždavinys. Atspindžio koeficientas yra dinamiškai kintantis

dydis, priklausantis nuo apdirbamo paviršiaus temperatūros, morfologinių, fizikinių ir cheminių charakteristikų. Apdirbamos medžiagos atspindžio koeficientą galima nustatyti tik apdorojimo metu, kai apdirbamas objektas yra kambario temperatūros arba taikant kompiuterinio modeliavimo programas.



1.5 pav. Lazerinės spinduliuotės sąveika su medžiaga:

a) atspindys; b) sugertis; c) pralaidumas (Chroma)

Fig. 1.5. The interaction of the laser radiation and the material:

a) reflection; b) absorbtion; c) transition

Lazerio spindulio pluošto sugertis kietame kūne, kaip ir kiekvienoje terpėje, yra apibūdinama terpės sugerties koeficientu, kuris įvertina sugertos galios kiekį vienetiniame terpės ilgyje.

Medžiagos sugerties koeficientas labai priklauso nuo spinduliuotės bangos dažnio ir ilgio, todėl tam tikro bangos ilgio spinduliuotę medžiaga gali stipriai sugerti, o kito bangos ilgio – praleisti su labai mažais nuostoliais (Sugioka *et al.* 2013). Terminis lazerinis apdorojimas galimas tik stipriai sugeriančių inžinerinių medžiagų.

Pagrindinės medžiagos optinės savybės lengvai nustatomos esant mažam šviesos intensyvumui, kai elektronų ir atomų būseną dėl sąveikos su šviesa nėra stipriai pakitusi (Kumar *et al.* 2007). Tačiau žinoma, kad galinga lazerio spinduliuotė keičia daugelio medžiagų optines savybes ir kartais labai stipriai (Zhang *et al.* 2007). Todėl lazerio spinduliuotės ir medžiagos sąveikai aprašyti neužtenka statinių dielektrinių funkcijų, o reikia atsižvelgti į dinaminį parametrų kitimą (Shaeffer 2012). Dėl tokio dinaminio parametrų kitimo sugertos spinduliuotės kiekis gali skirtis nuo teorinių reikšmių (Yu *et al.* 2010).

Visus lazerio spindulio pluošto sukeltus kietųjų kūnų optinių savybių pokyčius galima priskirti prie vieno iš trijų pokyčio mechanizmų (Dahotre *et al.* 2011). Didėjant lazerio spinduliuotės intensyvumui, šie pokyčio mechanizmai kinta ir juos galima išdėstyti tokia tvarka:

- Medžiagos ir laisvų elektronų tankio kitimas.

- Laisvų krūvininkų optinė generacija dėl tarpjuostinių šuolių ar staigios jonizacijos dielektrikuose ir puslaidininkuose.
- Daugiafotonė sugertis dėl intensyvaus lazerio pluošto elektrinio lauko poveikio.

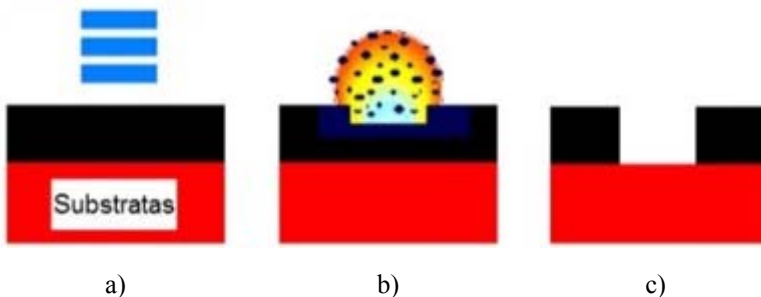
Kintant metalo temperatūrai, vyksta tam tikri reiškiniai, kurie susiję su metalų sugerties koeficiento kitimu (Gurr *et al.* 2016).

Svarbiausia lazerių ypatybė, naudojama apdorojant medžiagas, yra jų galimybė sudaryti pasirinktame apdorojamo paviršiaus taške labai didelį spinduliuotės intensyvumą, kuris yra sunkiai pasiekiamas kitais optiniais būdais (Ulkar *et al.* 2010). Taip galima gauti labai greitą mažos srities kaitinimą (Purtonen *et al.* 2014).

1.4.1. Lazerio spidulio pluošto poveikis apdirbamo metalo paviršiui

Kai lazerio spidulio pluošto energija pasiekia 10^5 W/cm^2 vertę (bendroji reikšmė plienams) (Balachninaite *et al.* 2008), apdirbamo ploto temperatūra pakyla virš lydymosi taško. Prasideda lazerinio lydymo procesas. Apdirbamos zonos temperatūra pakyla didinant poveikio laiką. Dažniausiai, siekiant sumažinti paviršinio sluoksnio mikronelygumų aukštį bei defektų skaičių, lazerinis lydymas atliekamas tiesiogiai apdirbant darbinį paviršių.

Kai apdirbamo ploto paviršiaus temperatūra priartėja prie virimo temperatūros, tolesnis įvedamos į ploto vienetą energijos didinimas nutraukia medžiagos lydymą palaipsniui procesui pereinant į garavimą (1.6 pav.) (Gibson *et al.* 2015). Lazerinis medžiagos garinimas vyksta ne iš paviršinio apdirbamo ploto, bet iš sluoksnio, esančio žemiau nei išorinis detalės / gaminio sluoksnis.



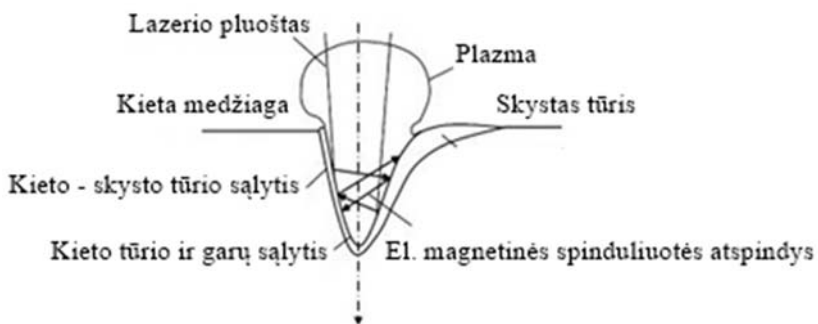
1.6 pav. Lazerinis paviršinio medžiagos sluoksnio garinimas: a) Impulsinės veikos lazerio pluoštas; b) Garinimas; c) Po lazerinio garinimo (Innovative manufacturing technology)

Fig. 1.6. Laser vaporization of top layer of the surface: a) The beam of the pulse laser; b) Vaporization; c) After laser vaporization

Dauguma medžiagų, veikiamų didelės energijos, skyla į sudedamąsias dalis arba išskiria tam tikras medžiagas, degimo produktus ir kt. (Long *et al.* 2015). Vyksta medžiagos disociacijos procesas. Disociacijos sparta arba efektyvumas priklauso nuo apdirbamos medžiagos, vertinamos kaip termodinaminė sistema, charakteristikų. Disociacijos metu apdirbamo ploto paviršiuje atsiranda atatranks slėgis.

Paviršiaus absorbuotas energijos kiekis bei temperatūra tiesiogiai veikia atatranks slėgį, kuris yra kritinis faktorius šalinant apdirbamo sluoksnio medžiagą lazerinio mikroapdorojimo metu (Gu *et al.* 2009).

Kai lazerio spindulio pluošto energijos tankis viršija kritinę ribą (10^5 W/cm^2), medžiaga yra nepertraukiamai garinama. Šio proceso metu vyksta labai sparti paviršinio sluoksnio jonizacija ir formuojasi plazma, kuriai būdingas iki 500 MPa slėgis bei apdirbamo kūno paviršiaus temperatūra siekia daugiau nei 5000 K (1.7 pav.) (Balachninaite *et al.* 2008).



1.7 pav. Plazmos gaubtas virš lazeriu apdorojamo paviršiaus
(Innovative manufacturing technology)

Fig. 1.7. Plasma shield above processing area

Susiformavęs plazmos srautas sumažina energijos kiekį, kurį gauna medžiagos apdirbamasis plotas, kai pastarojo temperatūra viršija kritinę ribą (Purtonen *et al.* 2014).

Plazmos srautas atlieka apsauginio ekrano vaidmenį. Tačiau dažniausiai plazmos formavimas apdirbamo ploto paviršiuje nėra pageidautinas dėl lazerinio proceso metu vykstančio apdorojimo efektyvumo sumažėjimo (Gillner *et al.* 2005). Dėl šios priežasties apdirbamo ploto jonizacijos laipsnis yra griežtai kontroliuojamas parametras (Bhaduri *et al.* 2016).

Keičiant įvedamos energijos kiekį, galima gauti skirtingus lazerinio apdorojimo metodus, besiskiriančius tarpusavyje savo fizikine prigimtimi (1.1 lentelė) (Demir *et al.* 2014). Prieš tai išvardyti mikrolazerinio apdorojimo metodai yra

pateikiami kaip atskiri būdai, būtina suprasti, kad riba, kai vienas procesas keičia kitą, yra labai siaura.

1.2 lentelė. Pagrindiniai mikrolazerinio apdorojimo procesai (Balachninaite *et al.* 2008)

Table 1.2. Main processes of the laser microprocessing

Energijos tankis, W/cm ²	Iki 10 ⁴	10 ⁴ –10 ⁵	10 ⁵ –10 ⁶	10 ⁶ –10 ⁷
Mikrolazerinio apdorojimo pro- cesas	Kaitinimas	Lydymas	Garinimas	Ekranuojanti plazma

Darbo metu pastebėta, kad energetinės mikrolazerinio apdorojimo reikšmės, pateikiamos literatūroje (Balachninaite *et al.* 2008; Mishra *et al.* 2015; Chavoshi *et al.* 2016), skiriasi nuo reikšmių gautų šio darbo eksperimentiniuose tyrimuose. Šiuo atveju didelę įtaką turi lazerinės spinduliuotės ir apdirbamos medžiagos tarpusavio sąveika. Labai svarbu suprasti, kad ne vien spinduliuotės charakteristikos, bet ir apdirbamo paviršiaus parametrai veikia lazerio mikroapdorojimą bei jo efektyvumą.

Lazerio spindulio pluošto ir apdorojamo paviršiaus sąveikos trukmė yra labai svarbus parametras, lemiantis lazerinės spinduliuotės poveikį medžiagai. Lazerinės spinduliuotės sugėrimą lemia sąveika su apdirbamoje medžiagoje esančiais elektronais. Sugėrę spinduliuotės kvantą elektronai persoka į aukštesnį sužadintą lygmenį. Sugerta energija virsta gardelės virpesių energija, t. y. šiluma (Sovizi *et al.* 2005). Lazerinę spinduliuotę galima nagrinėti kaip šilumos šaltinį, esantį detalės paviršiuje arba arti jo (Bhaduri *et al.* 2016). Parenkant paviršiaus apdorojimo būdą, reikia atsižvelgti į šias svarbiausias lazerinės technologijos taikymo ypatybes (Gibson *et al.* 2015):

- Sufokusuoto lazerio spindulio pluošto galios tankis yra didesnis nei daugelio kitų žinomų kaitinimo šaltinių.
- Lazerio spindulio pluoštu galima paveikti nedidelę apdirbamos detalės sritį (0,1 μm ir mažesnę), todėl galima apdirbti labai preciziškai. Tai labai svarbu apdirbant medžiagas, linkusias į fazinius virsmus.
- Lazerio spindulio pluošto energija yra didelė, todėl apdorojimas trunka daug trumpiau nei kitais būdais. Pavyzdžiui, suvirinimo lazerio spindulio pluoštu greitis 10–20 kartų didesnis negu dujinio suvirinimo.
- Dėl lazerinio proceso lokalumo ir spartos išvengiama liekamųjų deformacijų, neiškraipoma detalės geometrija.
- Dėl didelio lazerio spindulio pluošto galios tankio galima apdirbti beveik visas žinomas medžiagas: metalus, nemetalines medžiagas, kietas, trapias, sunkiai lydomas ir kitas.

- Lazerio spindulio pluoštą galima nukreipti iš vienos darbo vietos į kitą tuo pačiu didinant įrenginio naudingumo koeficientą. Naudojant optines ir veidrodines sistemas, galima apdirbti sunkiai pasiekiamas vietas.
- Lazerio spindulio pluoštas, palyginti su elektronų spindulio pluoštu, kurio technologinės galimybės analogiškos, yra pranašesnis tuo, kad nereikia vakuumo kamerų.
- Kadangi lazerio spindulio pluošto poveikis yra bekontaktis, technologinis procesas yra „chemiškai švarus“.
- Procesas gali būti visiškai automatizuotas.

1.4.2. Faziniai virsmai lazerio spindulio veikiamo metalo paviršiuje

Keičiant lazerinės spinduliuotės pluošto galią, poveikio trukmę, energijos tankį ir kt., galima nesunkiai keisti pagrindinius mikrolazerinio apdorojimo procesus (Sovizi *et al.* 2005). Remiantis darbe atlikta analize, lazerinio proceso našumas labai priklauso nuo apdorojimo proceso parametrų bei apdorojamos medžiagos paviršinio sluoksnio geometrinių ir fizikinių charakteristikų. Perėjimą nuo vieno mikrolazerinio apdorojimo proceso prie kito lemia skirtingas energijos kiekis, suteiktas ploto vienetui (Zhu *et al.* 2016). Tai lemia paviršinio sluoksnio morfologiją bei mechaninių charakteristikų pokytį. Todėl visiškai aišku, kad būtina nustatyti lazeriu apdirbamo paviršiaus struktūrinių pokyčių principus.

Metalui pereinant iš vienos polimorfinės modifikacijos į kitą, šiluma sugeriama (kaitinant) arba išskiriama (aušinant). Tam reikalingas atitinkamo dydžio perkaitinimas / peraušinimas lyginant su pradine būsena (Valiulis 2008). Fizikiniams ir struktūriniams pokyčiams tirti naudojamos lydinių būsenos diagramos. Plieno terminio apdorojimo procesas prasideda kaitinant termiškai stabilaus austenito srityje. Užgrūdinto plieno savybės priklauso nuo kaitinimo temperatūros, trukmės ir aušinimo greičio (Valiulis 2005). Didelę reikšmę turi pradinis medžiagos apdorojimas. Labai sunku nustatyti austenizacijos kinetines sąlygas, esant lazeriniam poveikiui (Balachninaite *et al.* 2008).

Terminio poveikio rezultatas priklauso nuo austenito virsmo produktų savybių auštant (grūdelių dydis, vienalytiškumo laipsnis). Pliene gali susiformuoti dviejų tipų ribinė struktūra: stambiagrūdė ir smulkiagrūdė. Lazeriniam grūdiniui būdingas didelis perkaitinimas, staigus aušinimas, todėl esant stambiagrūdžei plieno mikrostruktūrai, gali susiformuoti terminiai įtrūkiai. Visa tai lemia, kad lazerinį apdorojimą geriau taikyti smulkiagrūdės mikrostruktūros plienui.

Atliekant eksperimentus, pastebėta, kad (Mishra *et al.* 2015):

- Lazerinio poveikio metu austenizacija vyksta greičiau nei toje pačioje temperatūroje kaitinant ruošinius aukšto dažnio srove ar krosnyje.

- Vienkartinio poveikio impulsai labai trumpi, todėl metalo fazės nespėja difuziškai sąveikauti.

Lazerinio apdorojimo metu, greitai auštant bandiniui, vyksta nedifuziniai virsmai. Kubinė centruoto paviršiaus austenito gardelė virsta iškreipta centruoto tūrio martensito gardele (Ulkar *et al.* 2010). Tačiau ne visas austenitas virsta martensitu, todėl grūdintuose plienuose visada yra liekamojo austenito.

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Atlikta išsami adityviosios gamybos, SLS technologijos ypatumų analizė. Nustatyta, kad selektyviajam lazeriniam sukepinimui netaikomi su gaminio geometrija susiję apribojimai. Atlikta AG ir tradicinių metalinių paviršių apdorojimo būdų lyginamoji analizė. Nustatyta, kad AG atveju technologinių operacijų skaičius, laiko bei ekonominės sąnaudos yra daug mažesnės negu tradicinio apdorojimo atveju.
2. Nustatyta, kad sukeptinti SLS gaminiai pasižymi dideliu paviršiaus šiurkštumu, mažu atsparumu dilimui. Todėl vienas iš pagrindinių SLS technologijos trūkumų yra būtinas sukeptintų gaminių tolesnis mechaninis arba kitoks apdorojimas. Viena iš tokių perspektyvių sukeptintų gaminių tolesnio apdorojimo technologijų gali būti lazerinio mikroapdorojimo technologija.
3. Atlikta išsami lazerio poveikio metalams analizė. Nustatyta, kad apdorojimo lazeriu kokybė ir našumas priklauso nuo šių parametrų: lazerio pluošto bangos ilgio, energijos tankio, kritimo kampo, impulsų generavimo dažnio ir poveikio trukmės, apdorojimo greičio, lazerio tipo, apdorojamo paviršiaus geometrinių ir fizikinių charakteristikų.
4. Nustatyta, kad taikant lazerinį apdorojimą, keičiami ne tik detalės geometriniai parametrai, bet ir modifikuojamas paviršius, keičiamos mechaninės, fizikinės ir cheminės apdorojamo paviršiaus charakteristikos. Tai leidžia prognozuoti, kad lazerinis mikroapdorojimas gali būti efektyviai pritaikytas siekiant modifikuoti (kompleksiškai pagerinti) Fe-Ni-Co miltelių pagrindu SLS sukeptintų gaminių darbinį paviršių charakteristikas.
5. Optimalių technologinių lazerinio mikroapdorojimo parametrų nustatymas remiantis vien tik literatūros analize, neįmanomas dėl labai didelio kiekio kintamųjų parametrų, turinčių įtaką medžiagų lazeriniam

mikroapdorojimui. Todėl būtini kompleksiniai, eksperimentiniai tyrimai, kurie leistų nustatyti gaminių, sukepintų selektyviu SLS būdu, paviršinio sluoksnio lazerinio modifikavimo proceso poveikį sluoksnio formavimosi procesui ir jo fizikinėms bei eksploatacinėms savybėms.

Darbo tikslui pasiekti būtina spręsti šiuos uždavinius:

1. Ištirti Fe-Ni-Co miltelių pagrindu sukepintų gaminių morfologiją, topografiją ir kitas charakteristikas.
2. Ištirti lazerinio mikroapdorojimo koncentruotosios energijos spindulio pluošto technologinių parametrų poveikį sukepintų SLS sluoksnių morfologijai, topografijai, fizikinėms, mechaninėms savybėms ir cheminei sudėčiai.
3. Nustatyti optimalius lazerinio mikroapdorojimo technologinius parametrus, siekiant gauti geriausių eksploatacinių savybių daugiafunkciją paviršių Fe-Ni-Co miltelių pagrindu.

Naudotos medžiagos ir sukepinto miltelinio geležies-nikelio-kobalto pagrindo paviršiaus tyrimo metodai

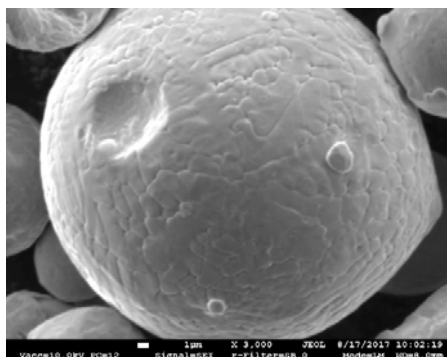
Darbe taikomi tyrimo metodai parinkti siekiant nustatyti koncentruotosios energijos šaltinio technologinių parametrų pokyčio poveikį apdirbamo paviršiaus kokybinėms charakteristikoms.

Skyriaus tematika paskelbti du autoriaus (su bendraautoriais) straipsniai (Markovič *et al.* 2016a; Markovič *et al.* 2016b).

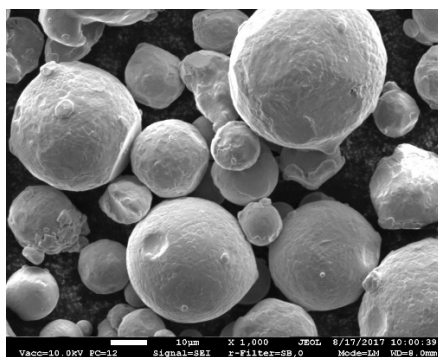
2.1. Tyrimams naudotos medžiagos

Sukepintam tūriui sudaryti panaudoti Fe-Ni-Co pagrindo milteliai (2.1 lentelė). Medžiaga pasirinkta atsižvelgiant į plačias šios medžiagos panaudojimo galimybes polimerų liejimo įrangos gamyboje.

Prieš atliekant lazerinio mikroapdorojimo įtakos sukepintų bandinių morfologijai analizę, atlikti sukepinimo miltelių morfologijos tyrimai (2.1 pav.).



a)



b)

2.1 pav. Sukepinimui naudojamų miltelių morfologija:

a) pirminės kristalizacijos struktūra; b) miltelių dalelių dariniai

Fig. 2.1. The morphology of powder usable for sintering

a) the structure of the primary crystallization; b) formations of the powder particles

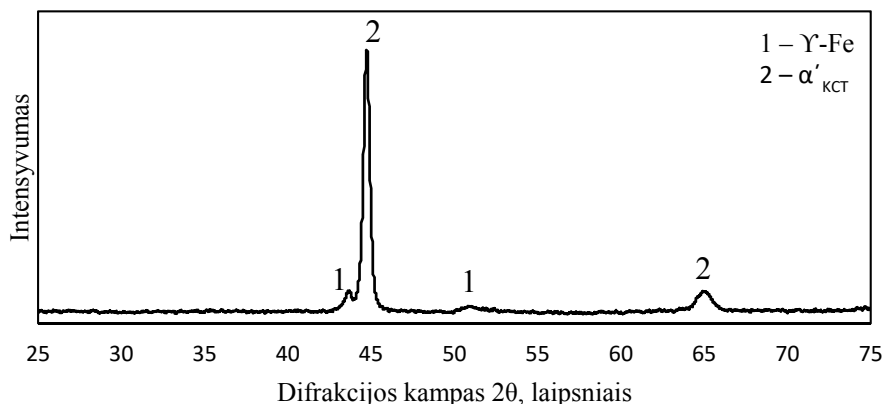
Selektyviojo lazerinio sukepinimo miltelių analizė parodė, kad miltelių frakcijos dydis svyruoja nuo 7 iki 30 μm . Miltelių dalelės yra netaisyklingos geometrinės formos (2.1 pav.). Dalelių paviršiuje galima matyti dentritinę pirminės kristalizacijos struktūrą (2.1 pav., a). Miltelių dalelių dalį sudaro dariniai, kurie susideda iš stambios dalelės ir kelių dispersiškai smulkių, prilipusių frakcijų (2.1 pav., b).

2.1 lentelė. Miltelių cheminė sudėtis pagal gamintojo specifikaciją, masės %

Table 2.1. Chemical composition (in wt. %) of the powder

Fe	C	Si	Mn	Ni	Mo	Ti	Co	Al
Likęs	0,03	iki 0,1	iki 0,1	17–19	4,8	iki 0,8	8,5–9,5	iki 0,1

Selektyviojo lazerinio sukepinimo miltelių rentgeno difrakcinė analizė parodė, kad tiriamuosius miltelius sudaro martensitinė struktūra su KCT gardele ir liekamasis austenitas (2.2 pav.). Diagramoje matomi tik ryškios geležies ir geležies nikelio junginio smailės. Tačiau geležies kietasis tirpalas pasižymi didesne gardele, rodančia, kad tai gali būti Mo ir Co turintis junginys. Labiausiai tikėtina, kad miltelius sudaro geležies ir nikelio tarpmetalinis junginys.



2.2 pav. Fe-Ni-Co miltelių rentgeno difrakcinė kreivė
Fig. 2.2. XRD pattern of the Fe-Ni-Co powder

2.2. Selektinio lazerinio sukepinimo technologijos įranga, parametrai ir charakteristikos

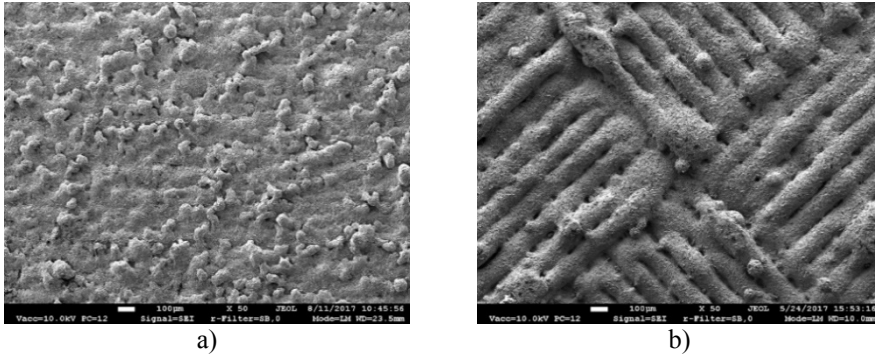
Miltelinio pagrindo bandinių gamybai panaudotas *Concept Laser M3* selektinio lazerinio sukepinimo įrenginys. Bandinių sukepinimo metu pagrindinių įrenginio technologinių parametų keitimas yra neįmanomas dėl gamintojo nustatytų apribojimų, siekiant užtikrinti įrenginio našumą bei gaminamos produkcijos kokybę. Technologiniai selektinio lazerinio sukepinimo parametrai pateikiami 2.2 lentelėje. Sukepintam tūriui atskirti nuo substrato buvo panaudotos vielinės elektroerozijos staklės „Charmille cut 200“. Atskirti nuo substrato bandiniai nuvalyti ultragarso vonelėje. Vonelės tūriui užpildyti panaudotas $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ tirpalas. Valymo trukmė 15 min. Valymo terpės temperatūra 40 °C.

2.2 lentelė. Selektinio lazerinio sukepinimo parametrai

Table 2.2. Conditions of the selective laser sintering

Lazerio			Sluoksnio storis, mm	Sukepinimo greitis, mm/s	Apsauginių dujų	
Bangos ilgis, nm	Galia, W	Dėmės dydis, mm			Tipas	Debitas, l / h
1064	100	Ø 0,2	0,03	0,2	Argonas	0,75

Atlikus mikroskopinius sukeptųjų bandinių tyrimus, nustatyta, kad šoniniai ir viršutiniai sukeptųjų bandinių paviršiai pasižymi visiškai skirtinga topografija. Šoninio paviršiaus atveju bandinio paviršiuje matomi netvarkingai ir chaotiškai išsidėstę iškilimai (2.3 pav., a). Viršutinio paviršiaus atveju matoma dėsingai susiformavusi fraktūra (2.3 pav., b). Šį esminį skirtumą lemia selektyviojo lazerinio sukepinimo proceso technologiniai ypatumai. Analizė rodo, kad geometrinio požiūriu neapdoroti šoniniai ir viršutiniai paviršiai yra visiškai skirtingi.



2.3 pav. Sukeptųjų bandinių topografija: a) šoninis sukeptinto bandinio paviršius; b) viršutinis sukeptinto bandinio paviršius

Fig. 2.3. Topographics images of sintered samples: a) lateral sintered surface; b) top sintered surface

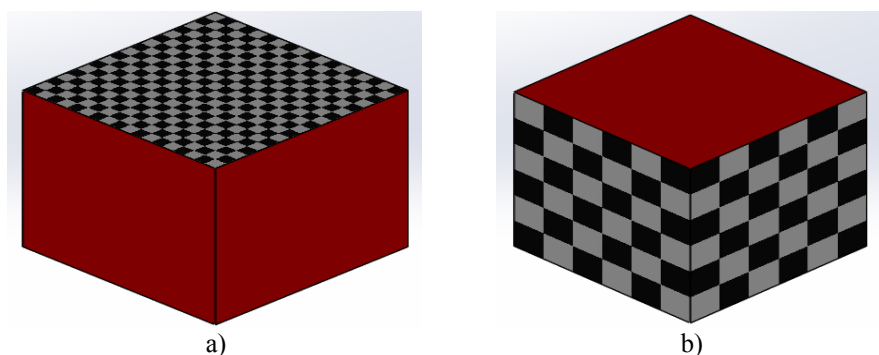
Literatūros šaltiniuose nurodoma (Balachninaite *et al.* 2008; Mishra *et al.* 2015; Farahmand *et al.* 2014; Shukla *et al.* 2015; Hu *et al.* 2011), kad geometriniai apdorojamo paviršiaus rodikliai lemia lazerinio apdorojimo proceso poveikį medžiagai. Siekiant nustatyti optimalius sukeptinto bandinio paviršiaus lazerinio mikroapdorojimo parametrus, tikslinga atlikti abiejų, viršutinio ir šoninio, sukeptųjų paviršių lazerinio mikroapdorojimo eksperimentinius tyrimus.

2.3. Paviršiaus modifikavimo įranga ir parametrai

Sukeptųjų bandinių paviršių lazeriniam mikroapdorojimui atlikti parinktas nanosekundinės, impulsinės veikos lazeris.

Sukeptas ir atskirtas nuo substrato ruošinys „Charmille cut 200“ elektroerozinio vielinio pjovimo staklėmis buvo sudalytas į vienodus bandinius, kurių matmenys $10 \times 10 \times 10$ mm. 2.4 paveiksle languotas plotas vaizduoja lazeriu apdorotą bandinio paviršių.

Bandinių apdorojimas koncentruotosios energijos šaltiniu buvo atliekamas Fizinių ir technologijos mokslų centre, Lazerinių technologijų mokslinėje laboratorijoje nanosekundinės, impulsinės veikos lazeriu „Baltic HP“. Technologiniai lazerinio įrenginio parametrai pateikiami 2.3 lentelėje.



2.4 pav. Sukepinto ir lazeriu apdorojamo bandinio erdvinis vaizdas:

a) viršutinis apdorojamas sukepintas paviršius; b) šoninis apdorojamas sukepintas paviršius

Fig. 2.4. Spatial view of the sintered and laser processed sample:

a) sintered and processed top surface; b) sintered and processed lateral surface

Sukepintam paviršiui būdingas skirtingos krypties didelis paviršiaus netolygumas, formuojasi ryškūs išgaubti aplydymo sluoksniai.

2.3 lentelė. „Baltic HP“ lazerinio įrenginio technoliniai parametrai

Table 2.3. Technical data of the “Baltic HP” laser machine

Lazerinės matricos tipas	Kristalinė
Lazerinės matricos medžiaga	Itrio vanadatas (YVO_4)
Aktyvatoriaus medžiaga	Nd
Spinduliuotės bangos ilgis λ , nm	1064
Galia P, W	20
Impulsų generavimo dažnis ν , kHz	10
Impulso trukmė τ , ns	10

Todėl įvertinti mikrolazerinio apdorojimo vieno takelio topografiją yra itin sudėtinga. Siekiant eliminuoti sukepinto paviršiaus topografijos charakteristikų poveikį lazerinio mikroapdorojimo rezultatams, tikslinga eksperimentinių tyrimų

pradžioje atlikti lazerinio mikroapdorojimo bandymus ant sukepinto ir papildomai nušlifuoto bandinio paviršiaus.

Sukepintų paviršių lazerinio mikroapdorojimo eksperimentiniai tyrimai suskirstyti į keturis esminius etapus:

- A eksperimentas – nušlifuoto iki $R_a = 0,2$ viršutinio paviršiaus (2.4 pav., a) dalinis apdorojimas esant dinaminei būsenai, bandiniui suteikiant pastūmą viena kryptimi.
- B eksperimentas – nušlifuoto iki $R_a = 0,2$ viršutinio paviršiaus (2.4 pav., a) visišką apdorojimą esant dinaminei būsenai, bandiniui suteikiant pastūmą dviem kryptimis.
- C eksperimentas – sukepinto šoninio paviršiaus (2.4 pav., b) visišką apdorojimą esant dinaminei būsenai, bandiniui suteikiant pastūmą dviem kryptimis.
- D eksperimentas – sukepinto viršutinio paviršiaus (2.4 pav., a) visišką apdorojimą esant dinaminei būsenai, bandiniui suteikiant pastūmą dviem kryptimis.

2.4. Technologiniai eksperimento parametrai

Lazeriniame mikroapdorojime labai svarbų vaidmenį atlieka energijos E kiekis, suteikiamas plotui S per laiko tarpą t . Siekiant susisteminti lazerinio mikroapdorojimo technologinius parametrus, darbe apskaičiuoti lazerinio apdorojimo įvedamos energijos lygmenys (2.4 lentelė).

$$E_i = \frac{P}{\nu}, \quad (2.1)$$

čia E_i – vieno impulso energija, J; P – lazerio spindulio pluošto galia, W; ν – impulsų generavimo dažnis, Hz.

$$E_{it} = \frac{E_i}{d^2}, \quad (2.2)$$

čia E_{it} – impulso energijos tankis, J/cm²; d – sufokusuoto lazerio spindulio pluošto skersmuo, cm.

$$E_{its} = E_{it} \cdot \nu, \quad (2.3)$$

čia E_{its} – energijos kiekis apdorojimo paviršiuje per vieną sekundę, W/cm².

$$E = \frac{E_{its} + (0,7 E_{its})}{Z}, \quad (2.4)$$

$$Z = \frac{V}{V'}, \quad (2.5)$$

čia E – įvedamoji energija W/cm^2 esant apdorojimo greičiui V' ; $0,7 E_{its}$ – gretimio ėjimo suteikiamas energijos tankis, W/cm^2 ; V' – atskaitos greitis, mm/s ; V – apdorojimo greitis, mm/s ; Z – apdorojimo ir atskaitos greičių matematinis santykis.

2.4 lentelė. Lazerinio apdorojimo įvedamos energijos W/cm^2 į bandinio paviršių skaičiavimo rezultatai

Table 2.4. The results of calculation of input energy at specimen surface laser processing, W/cm^2

Apdorojimo greitis v , mm/s	Įvedamos energijos tankis W/cm^2 , esant skirtingai apdorojimo galiai P , W					
	1	2	2,5	3	3,5	4
1	265 306	530 612	663 265	795 918	928 571	1 061 224
2,5	106 122	212 245	265 306	318 367	371 429	424 490
5	53 061	106 122	132 653	159 184	185 714	212 245
7,5	35 374	70 748	88 435	106 122	123 810	141 497

2.5 lentelė. Lazerinio apdorojimo įvedamos energijos W/cm^2 lygmenys

Table 2.5. The levels of input energy for laser processing

Apdorojimo greitis v , mm/s	Įvedamos energijos tankis W/cm^2 , esant skirtingai apdorojimo galiai P , W				Įvedamos energijos lygmuo
	2	2,5	3	3,5	
1	530 612	663 265	795 918	928 571	E3
2,5	212 245	265 306	318 367	371 429	E2
5	106 122	102 041	122 449	142 857	E1

Lazerio spindulio pluošto dėmės plotas bandinio paviršiuje $d = 25 \mu\text{m}$. Dėmės plotas visų bandymų metu nebuvo keičiamas.

Ekperimento tyrimų etapų A–D technologinių parametrų reikšmės pateiktos antrame priede.

B, C ir D eksperimentų metu sanklotos reikšmė nebuvo keičiama. Sanklota, tai lazerio spindulio pluošto atstumas tarp dviejų gretimų ėjimų, kuris apskaičiuojamas pagal 2.6 formulę:

$$\text{Sanklota} = d \times 0,7, \quad (2.6)$$

čia d – lazerio spindulio pluošto dėmės plotas bandinio paviršiuje, μm ; 0,7 – koeficientas sanklotos dydžiui nustatyti. Sanklotos reikšmė pasirinkta remiantis literatūros analize. Šį parametą taip pat galima vadinti skenavimo žingsniu.

Lazerinis paviršiaus apdorojimas atliktas esant dinaminei būsenai, bandiniui suteikiant pastūmą dviem kryptimis. Visi lazeriu apdoroti bandiniai, prieš pradedant instrumentinius tyrimus, nuvalyti ultragarso vonelėje.

2.5. Eksperimentinio tyrimo metodika

Darbe atlikti kompleksiniai sukepinto ir koncentruotosios energijos šaltiniu apdoroto paviršiaus tyrimai. Jų metu analizuota sukepinto ir koncentruotosios energijos šaltiniu apdoroto paviršiaus makro ir mikrostruktūra, cheminė sudėtis. Atlikti eksperimentinių bandinių mikrokietumo, paviršinio sluoksnio mikronelygumų tyrimai. Ištirtos tribologinės paviršių savybės. Atlikti korozijos tyrimai.

2.5.1. Optinė mikroskopija

Optinės mikroskopijos tyrimai atlikti analitiniu mikroskopu NIKON MA200, aprūpintu integruota vaizdo kamera ir programiniu duomenų apdorojimo paketu. Mikrostruktūra tirta naudojant 10 ir 20 kartų didinimą.

Metalografiniams tyrimams atlikti bandiniai buvo įtvirtinti plastikinėse formose, o tarpas tarp formos ir bandinio buvo užpildomas epoksidine derva. Mikrošlifams paruošti atliktas paviršinio bandinių sluoksnio poliravimas, naudojant skirtingo grūdėtumo popierių nuo P100 iki P2000. Tolesnis tiriamų paviršių poliravimas buvo atliekamas, naudojant poliravimo pastas, kurių grūdėtumas nuo 3 iki $1\mu\text{m}$. Poliravimo našumui padidinti naudota KEMET gamintojo poliravimo suspensija. Po poliravimo šlifai nuplauti etilo alkoholio tirpalu ir džiovinti karšto oro srove. Bandinių mikrostruktūra tirta dviem etapais: po poliravimo ir po ėsdinimo. Ėsdinimui buvo naudojamas tirpalas sudarytas iš šių elementų: vandens: (1 dalis), acto rūgšties (1 dalis), druskos rūgšties (4 dalis) ir azoto rūgšties (1 dalis). Optinės mikroskopijos būdu nustatytas lazerinės spinduliuotės paveikto ploto gylis bei mikrostruktūra.

2.5.2. Skenuojamoji elektroninė mikroskopija ir rentgeno mikroanalizė

Skenuojamosios elektroninės mikroskopijos (SEM) tyrimai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Termoizoliacijos mokslo instituto Statybinių medžiagų laboratorijoje. Tyrimai atlikti SEM JEOL JSM-7600F skenuojamosios elektroninės mikroskopijos prietaisu su antrinių elektronų SE detektoriumi.

Elektroninės mikroskopijos parametrai: greitinančioji įtampa 10 kV, atstumas iki bandinio paviršiaus 11 mm, padidinimas nuo 50 iki 1000 kartų, temperatūra 22 °C.

Sukepinti ir lazeriu apdoroti bandinių paviršiai tirti SEM būdu antrinių elektronų signalu. Bandinių paviršiai buvo chemiškai nuvalyti C_3H_8O tirpalu, norint pašalinti įvairius paviršiaus nešvarumus. Papildomai analizuota žaliavos (miltelių) ir eksperimentinių bandinių cheminė sudėtis, taikant rentgeno mikroanalizės metodą (RMA).

2.5.3. Rentgeno spindulių difrakcijos analizė

Medžiagų kokybinė fazinės sudėties analizė atlikta SMART LAB (Japonija) rentgeno difraktometru. Rentgeno spinduliuotės spektrui išskirti naudotas grafito monochromatorius. Bandymų parametrai: 9 kV įtampa, difrakcijos kampo 20 intervalas nuo 20 iki 80°, detektoriaus judėjimo žingsnis – 0,02°. Difraktograma užrašyta 1°/min. greičiu. Bandymas atliktas 22 °C temperatūroje.

Tyrimai atlikti su sukepinimui naudotais Fe-Ni-Co milteliais, sukepintais ir lazerio spinduliuote apdorotais bandiniais. Visi analizės rezultatai yra pateikiami difrakcinėse kreivėse, kurios rodo atsispindėjusių rentgeno spindulių intensyvumo priklausomybę nuo detektoriaus kampo.

2.5.4. Paviršiaus šiurkščio matavimas

Tiriamų sukepintų ir koncentruotosios energijos šaltiniu apdorotų sukepintų bandinių paviršiaus mikronelygumų parametrai nustatyti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos fakulteto Medžiagotyros ir suvirinimo mokslinėje laboratorijoje naudojant portatyvinį profilometrą TR-200, kurio tikslumas $\pm 0,01 \mu m$.

Matavimai remiasi deimantinės adatos kontaktine sąveika su tiriamu paviršiumi horizontalioje padėtyje. Paviršiuje esantys nelygumai sukelia vertikalius adatos poslinkius, kurie interpretuojami kaip paviršiaus nelygumai. Programine įranga apdorojus duomenis, gaunama linija, atvaizduojanti paviršiaus topografiją. Buvo nustatytas koncentruotosios energijos šaltiniu apdorotų – sukepintų paviršių vidutinis mikronelygumų aukštis R_a .

2.5.5. Mikrokietumo matavimai

Tiriamų sukepintų ir koncentruotosios energijos šaltiniu apdorotų sukepintų bandinių mikrokietumo matavimai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos fakulteto Medžiagotyros ir suvirinimo katedros mokslinėje laboratorijoje. Mikrokietumas vertintas poliruotuose paviršiuose ir skersiniuose

mikrošlifuose su *Zwick Roell ZHμ* universaliu automatizuotu kietmačiu su 1 % matavimo paklaida. Matavimai atlikti mikrovikerso metodu su 100 g apkrova ir 10 s išlaikymo laiku, optinis padidėjimas 50 kartų. Suskaičiuotas sukepinto metalo ir koncentruotosios energijos šaltiniu apdoroto sluoksnio mikrokietumo vidurkis iš 10 matavimo rezultatų, atmetant mažiausią ir didžiausią reikšmes.

2.5.6. Tribologiniai tyrimai

Tiriamų sukepintų ir koncentruotosios energijos šaltiniu apdorotų sukepintų bandinių atsparumas trinčiai buvo įvertintas atliekant sausosios trinties bandymą. Bandymai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos fakulteto Medžiagotyros ir suvirinimo katedros mokslinėje laboratorijoje bei Baltstogės technikos universiteto Mechanikos fakulteto Medžiagotyros katedroje. Bandymai Baltstogėje atlikti *Microtest* „Pin-on-disc“, „Ball-on-disc“ tribometru, naudojant tokius eksperimento režimus: slydimo kelias – 200 m, slydimo greitis – 300 aps./min, trajektorijos spindulys – 2 mm, apkrova – 5 N, bandymo temperatūra – 23 °C. Eksperimentiniam tyrimui atlikti pasirinkta „Pin-on-disc“ trinties schema. Indentorius – 3 mm skersmens grūdintas cilindras, pagamintas iš nerūdijančio plieno 1.4034.

Bandymai Vilniuje atlikti *Microtest* „Pin-on-disc“, „Ball-on-disc“ tribometru, naudojant tokius eksperimento režimus: slydimo kelias – 400 m, slydimo greitis – 300 aps./min, trajektorijos spindulys – 2 mm, apkrova – 5 N, bandymo temperatūra – 23 °C. Eksperimentiniam tyrimui atlikti pasirinkta „Ball-on-disc“ trinties schema. Indentorius – guoliams naudojamas 6 mm skersmens grūdintas rutuliukas, kuris pagamintas iš AISI52100 nerūdijančio plieno.

Eksperimentinių bandinių atsparumas trinčiai įvertintas lyginant žemiau pateiktus parametrus prieš ir po trinties bandymų:

- rutuliuko kontakto dėmės geometriją;
- bandinio masės pokytį;
- bandinio kontakto dėmės geometriją.

Svėrimui naudotos analitinės elektroninės svarstyklės „Precisa XR 205SMDR“, kurių tikslumas 10 μg.

2.5.7. 3D optinė profilometrija

Koncentruotosios energijos šaltiniu apdorotų sukepintų bandinių 3D paviršiaus topografija ir šiurkštis buvo nustatomi naudojant bekontaktį optinį prietaisą. Tyrimas atliktas Fizinių ir technologijos mokslų centre. Pagrindiniai bandymų parametrai: darbinis atstumas 4,7 mm, optinė raiška 0,67 μm³, skaitmeninė apertūra 0,4, praktinis maksimalus nuolydis 18,9 laipsnių. Dėl labai mažo koncentruotosios energijos pluoštu apdirbtų paviršių atspindžio eksperimentinių

bandinių tiriamieji paviršiai garinimo būdu padengti plona apie 10 nm storio aukso plėvele. Eksperimentinių bandinių topografija įvertinta naudojant vidutinį paviršiaus mikronelygumų aukščio parametą R_a .

2.5.8. Korozinio atsparumo bandymai

Koncentruotosios energijos šaltiniu apdorotų sukepintų bandinių atsparumas korozijai įvertintas potenciodinaminės poliarizacijos matavimu. Eksperimentiniai bandymai buvo atliekami naudojant elektrocheminių matavimų sistemą SOLARTON 1280C (Jungtinė Karalystė). Ją sudaro potenciostatas, galvanostatas, dažnių generatorius ir impedanso spektrų analizatorius. Matavimai atlikti naudojant trijų elektrodų elektrocheminę celę. Platinos viela buvo naudojama kaip pagalbinis elektrodas, o lyginamuoju elektrodu buvo Ag/AgCl/KCl. Korozinio atsparumo tyrimai buvo atlikti 0,5 M Na_2SO_4 terpėje.

Elektrocheminiai matavimai buvo atliekami po 60 min., nusistovėjus korozijos potencialui, skleidžiant potencialą į anodinę ir katodinę pusę. Potencialo sklidimo greitis buvo 10 mV/s. Elektrocheminiai parametrai, tokie kaip korozijos potencialas (Ekor.) ir korozijos srovė (j), nustatyti naudojant atitinkamą duomenų apdorojimo programinę įrangą.

2.6. Antrojo skyriaus išvados

1. Tyrimo metų nustatyta, kad šoniniai ir viršutiniai sukepintų SLS bandinių paviršiai pasižymi visiškai skirtinga topografija. Šoniniam paviršiui būdingi netvarkingai ir chaotiškai išsidėstę iškilimai, o viršutinio paviršiaus atveju – dėsningai susiformavusi fraktūra.
2. Siekiant įvertinti selektyviojo lazerinio sukepimo proceso technologinius ypatumus ir papildomo lazerinio mikroapdorojimo įtaką sukepinto Fe-Ni-Co pagrindo paviršiaus charakteristikoms būtina taikyti 4 etapų (A, B, C ir D) eksperimentinių tyrimų metodiką.
3. Skenuojančios elektroninės mikroskopijos ir rentgeno spindulių difrakcijos metodai, paviršinio sluoksnio morfologijos ir nevienalytiškumo analizės, cheminės ir fazinės sudėties bei tribologinių savybių tyrimo, korozinio atsparumo vertinimo bei mikrokietumo matavimo tyrimai leidžia įvertinti sukepintų Fe-Ni-Co miltelių pagrindu bandinių galutinio greitojo lazerinio paviršiaus mikroapdorojimo režimų poveikį ir įvertinti jo efektyvumą.

Sukepintų miltelinio pagrindo paviršių modifikavimo koncentruotosios energijos šaltiniu proceso ir eksploatacinių savybių tyrimai

Skyriuje pateikiama sukepintų ir koncentruotosios energijos šaltiniu apdorotų paviršių sandaros ir eksploatacinių savybių tyrimų analizė.

Skyriaus tematika paskelbti du autoriaus (su bendraautoriais) straipsniai (Markovič *et al.* 2015a; Markovič *et al.* 2016c).

3.1. Sukepintų ir koncentruotosios energijos šaltiniu apdorotų bandinių topografijos analizė

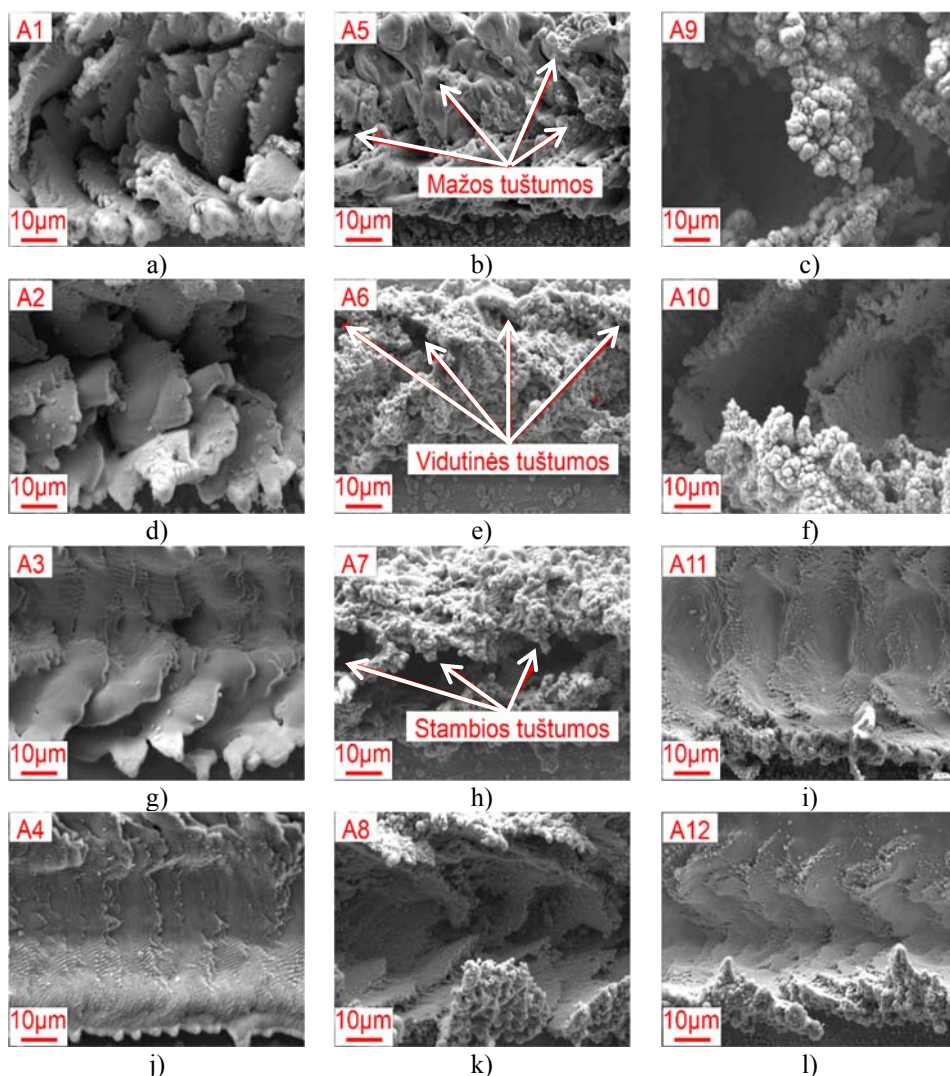
Darbe nagrinėjama sukepinimui naudotų miltelių bei sukepintų A, B, C ir D eksperimentinių bandinių morfologija.

A eksperimento metu lazeriu buvo iš dalies nuskenuoti bandinių paviršiai, siekiant nustatyti geriausius koncentruotosios energijos šaltinio technologinių parametrų derinius bei pastarųjų įtaką lazerinio mikroapdorojimo proceso pokyčiui. Literatūros šaltinių analizė parodė, kad efektyviausią eksperimentinių Fe-Ni-Co sukepintų bandinių mikrolazerinį apdorojimą galima pasiekti esant lazerinio garinimo procesui. Lazerinio apdorojimo procesas labai priklauso nuo geometrinių apdorojamo paviršiaus charakteristikų.

A eksperimento metu buvo atliktas bandinių paviršinio sluoksnio lazerinis apdorojimas, bandiniui suteikiant pastūmą viena kryptimi ir iš dalies apdorojant bandinio plotą. Prieš lazerinį apdorojimą bandiniai buvo nušlifuoti iki $R_a = 0,2 \mu\text{m}$. 3.1 paveiksle matoma medžiagos apdorojimo intensyvumo ir lazerio energijos tankio pokyčio įtaka apdoroto paviršiaus topografijai bei lazeriniam mikroapdorojimo procesui. Analizė atlikta siekiant nustatyti esminius mikrolazerinio apdorojimo procesus bei įvedamos energijos vertes, kurioms esant stebimas konkretus procesas. 3.1 paveiksle matomas ryškus apdoroto paviršiaus (takelio) topografijos pokytis, kurį lemia skirtingas lazerinio apdorojimo įvedamos energijos kiekis nuo 35 kW/cm^2 (A1 bandinys) iki 1061 kW/cm^2 (A9 bandinys).

Priklausomai nuo energijos kiekio, suteikto apdorojamo ploto vienetui, gali vykti skirtingi lazerio spindulio pluošto ir apdorojamos medžiagos sąveikos procesai: kaitinimas, lydymas, garinimas ir ekranuojančios plazmos formavimas.

Tyrimų metu nustatyta, kad apdorojant lazeriu (1 ėjimu) SLS būdu sukepintus ir papildomai nušlifuosius bandinius bei keičiant lazerinio mikroapdorojimo parametrus (lazerio galią nuo 1 W iki 4 W , apdorojimo greitį nuo 1 mm/s iki $7,5 \text{ mm/s}$), galimi keturi esminiai lazerinio mikroapdorojimo procesai: kaitinimas, lydymas, garinimas ir ekranuojančios plazmos formavimas. A1 ir A2 bandiniuose, apdorotuose taikant 1 W galią ir nedidelius 1 ir $2,5 \text{ mm/s}$ greičius, susiformavo grublėta stambių žvynų su giliais tarpais topografija (3.1 pav., a ir d), kuri būdinga lazerinės abliacijos režimui. A3 ir A4 bandiniuose, kuriuose padidinus apdorojimo greitį buvo sumažintas įvedamos energijos kiekis, stebima tolygesnė smulkesnių žvynelių topografija (3.1 pav., g ir j) – abliacijos režimas perėjo į lydymą. A5–A8 bandinių, apdorotų taikant didesnę $2,5 \text{ W}$ lazerio galią, morfologija gerokai skiriasi nuo pirmų keturių bandinių. Čia stebimi intensyvaus garavimo pėdsakai (3.1 pav., b, e, h ir k); metalas paviršiuje susikristalizavo į smulkių sferinių granulių pavidalo dalelių sankaupas. A9–A12 bandiniuose, dar labiau padidinus galią (4 W), suformuoti gilūs grioveliai ir didelės tuštumos tarp garintos medžiagos. Įvedamos energijos vertėms artėjant prie 1 MW/cm^2 reikšmės kyla pavojus, kad garinant medžiagą apdorojimo metu virš apdirbimo zonos gali susiformuoti ekranuojanti plazma.



3.1 pav. A eksperimento bandinių lazeriu apdoroto takelio topografija:

a) A1; b) A5; c) A9; d) A2; e) A6; f) A10; g) A3; h) A7;

i) A11; j) A4; k) A8; l) A12

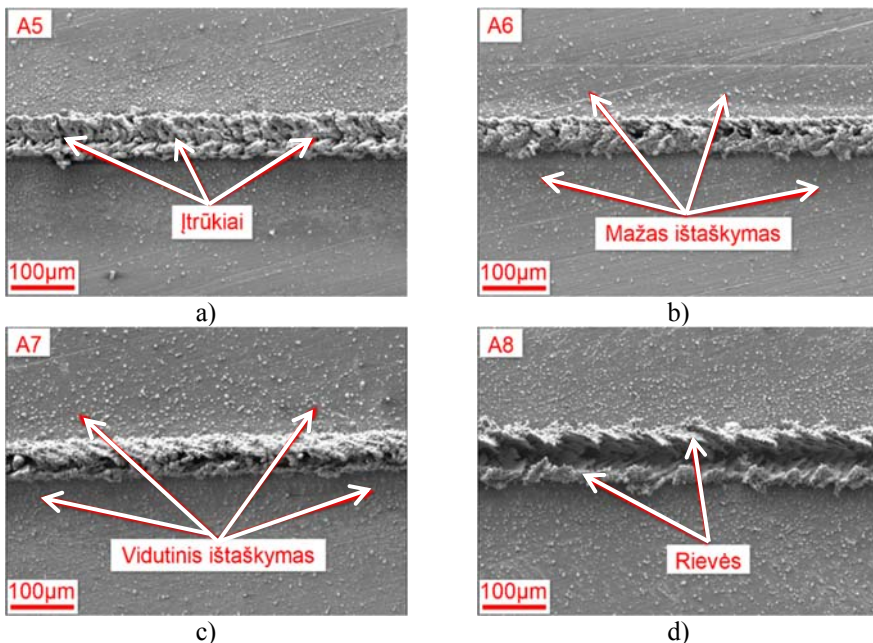
Fig. 3.1. Topographics images of the laser processed pathes of the A experiment samples: a) A1; b) A5; c) A9; d) A2; e) A6; f) A10; g) A3; h) A7; i) A11; j) A4; k) A8; l) A12

Lazeriu apdorojant sukepintus paviršius, siekiama pašalinti (išgarinti) ploną paviršinių sukepintą sluoksnį, nepasiekiant ekranuojančios plazmos formavimosi, kuri stipriai sumažintų apdorojimo greitį, proceso efektyvumą ir stabilumą dėl

dinamiškai kintančios terpės, pro kurią praeina lazerio spindulio pluoštas, lūžio rodiklio pokyčio (Balachninaite *et al.* 2008). Todėl, tolesnei analizei buvo pasirinkti A5–A8 bandiniai. Siekiant kokybiškai įvertinti mikrolazerinio garinimo poveikį paviršiaus topografijai, A5–A8 bandiniai buvo vertinami 5 balų skalėje. Vertinimas atliktas remiantis 3.1 ir 3.2 paveikslų analize.

A5 bandinio paviršinio sluoksnio topografiniuose vaizduose (3.2 pav., a) apdoroto takelio paviršiuje stebimi daugybiniai įtrūkiai bei vidutinis išgarintos medžiagos dalelių ištaškymas terminio poveikio zonoje. Trūkių atsiradimą lemia vidiniai įtempiai, kurie atsirado dėl greito apdorojimo zonos įkaitinimo bei staigaus aušinimo (terminis šokas). A6–A8 bandinių paviršiuose, kurie buvo apdorojami taikant tą pačią 2,5 W galią ir nuosekliai didinant apdorojimo greitį (2,5 / 5 / 7,5 mm/s) trūkiai nėra matomi dėl mažesnio energijos kiekio, suteikto apdorojimo plotui.

A6 ir A7 bandinių topografija rodo lazerinio mikroapdorojimo, esant greičiui nuo 2,5 iki 5 mm/s, poveikio panašumą. Tačiau A7 atveju matomos stambios tuštumos (3.1 pav., h) bei vidutinis išgarinto sluoksnio ištaškymas (3.2 pav., c).



3.2 pav. A eksperimento bandinių paviršiaus topografija: a) A5; b) A6; c) A7; d) A8

Fig. 3.2. Topographics images of the surface of the A experiment samples:

a) A5; b) A6; c) A7; d) A8

A6 bandinio paviršiuje susiformavo vidutinės tuštumos (3.1 pav., e) ir mažas išgarinto sluoksnio ištaškymas (3.2 pav., b). Medžiagos apdorojimo rezultato skirtumą lemia išlydyto tūrio dinaminio judėjimo bei kristalizacijos sparta. A7 bandinio paviršiuje (3.2 pav., c), matomas tankesnis tiškalų išsidėstymas. Defektas atsiranda dėl didesnio lazerinio apdorojimo dinaminio procesų intensyvumo.

Didinant apdorojimo greitį iki 7,5 mm/s (A8 bandinys 3.2 pav., d), stebimas išlydyto bei garinamo tūrio išskyrimas į dvi dalis. Reiškinį lemia vienu metu vykstantis medžiagos lydymo bei garinimo procesas. Esant šiam reiškiniui, visiškai apdirbamo bandinio paviršiuje formuojasi rievės, kurios neigiamai veikia apdorojamo paviršiaus kokybės rodiklius.

Atsižvelgiant į lazeriniu mikroapdorojimu suformuotų takelių bendrą morfologiją, jų vientisumą, banguotumą, įtrūkių ir tuštumų dydį bei kiekį, ištaškymo laipsnį ir kt., A5–A8 bandiniai buvo įvertinti penkių balų sistemoje (3.1 lentelė). Kuo aukštesnis įvertinimo balas, tuo geresnė paviršiaus topografija.

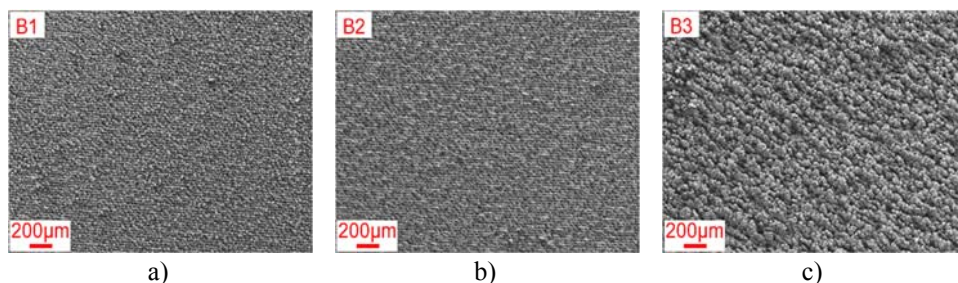
3.1 lentelė. A5–A8 bandinių kokybės analizės rezultatai

Table 3.1. The results of the quality analyse, samples A5–A8

	Bandinio žymuo			
	A5	A6	A7	A8
Įvertinimas	3	5	4	2

Įvertinus visus kriterijus, nustatyta, kad geriausią paviršiaus morfologiją (5 balai) turi A6 bandiniai, kurie apdoroti esant 265 kW/cm² energijos tankiui ir kuriems būdingas mažas išsitaškymas, tuštumų dydis ir kiekis.

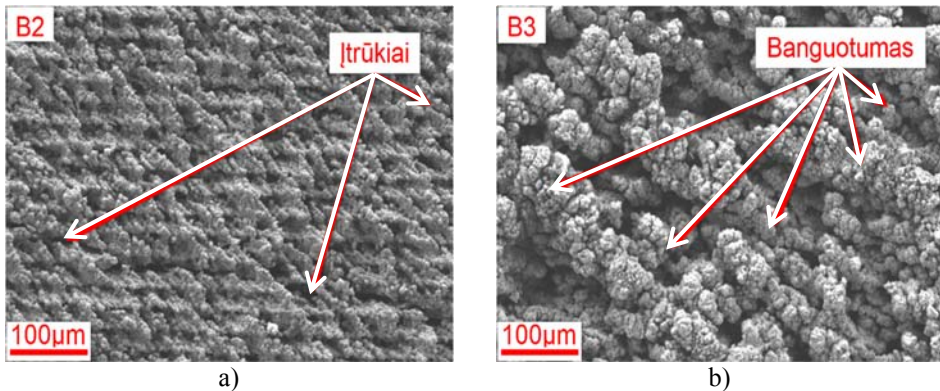
B eksperimento metu lazeriu buvo apdorotas visas bandinio paviršius, siekiant nustatyti koncentruotos energijos šaltinio ėjimų skaičiaus įtaką bandinio topografijai bei medžiagos mikrolazerinio apdorojimo proceso pobūdžiui.



3.3 pav. B eksperimento bandinių paviršiaus topografija: a) B1; b) B2; c) B3

Fig. 3.3. The topography of the surface of specimens in the experiment B:
a) B1; b) B2; c) B3

Atliktas bandinių paviršinio sluoksnio apdorojimas, bandiniui suteikiant pastumą dviem kryptimis, visiškai apdorojant bandinio plotą. Prieš lazerinį apdorojimą bandiniai buvo nušlifuoti iki $R_a = 0,2 \mu\text{m}$. 3.3 ir 3.4 paveiksluose vaizduojama tipinė topografija esant skirtingam lazerinio mikroapdorojimo ėjimų skaičiui.



3.4 pav. B eksperimento bandinių lazeriu apdoroto paviršiaus defektai : a) B2; b) B3

Fig. 3.4. Topographics images of the laser processed surface defects of the B experiment samples: a) B2; b) B3

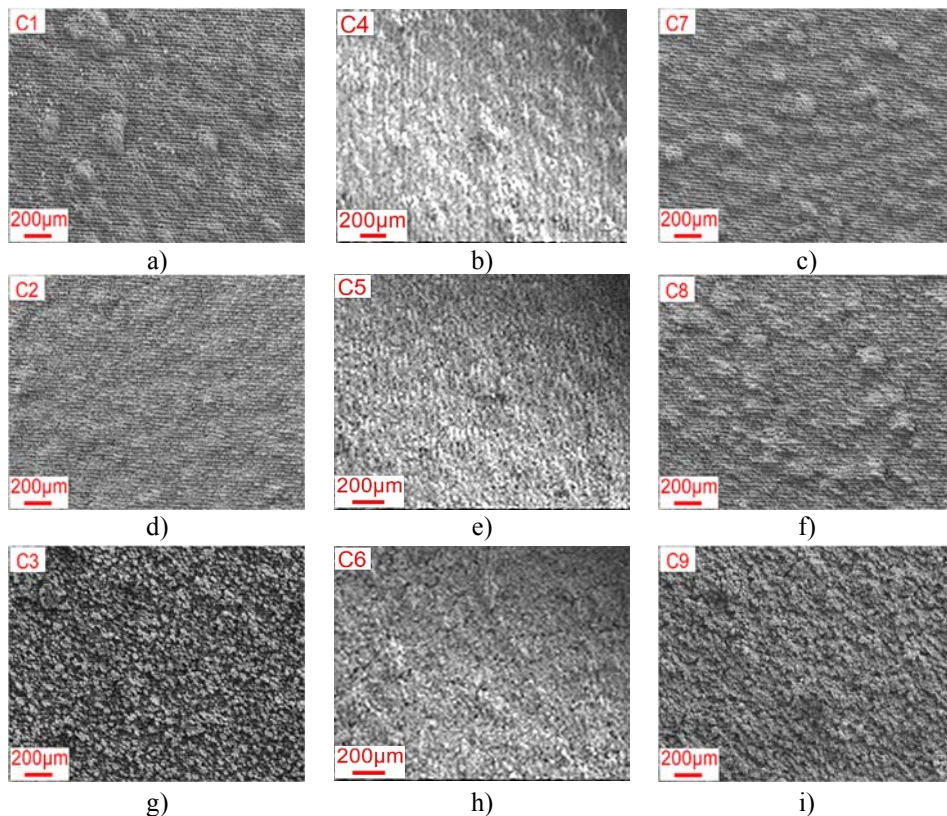
Lazerio spinduliuote visiškai apdorojant sukepintą ir papildomai nušlifuotą paviršių vienu ėjimu, susiformuoja kryptinga, palyginti smulki ir tolygi apdoroto paviršiaus topografija be defektų (3.3 pav., a.). B2 bandinio bendras paviršiaus vaizdas (3.3 pav., b), mažai skiriasi nuo B1, tačiau ėjimų skaičiaus didinimas nuo 1 iki 2 kartų lėmė įtrūkių atsiradimą B2 bandinyje. Kadangi antras apdorojimo ėjimas atliekamas nespėjus bandiniui ataušti po pirmo ėjimo, įtrūkių atsiradimą lėmė perteklinis paviršiaus perkaitinimas. Ėjimų skaičių padidinus iki 4 kartų B3 bandinio paviršiuje susiformavo stambesnė (3.3 pav., c), savita, bangota morfologija, kurią lėmė ypač didelis apdorojimo zonos įkaitinimas.

Remiantis B1–B3 bandinių morfologijos analize, geriausia apdoroto paviršinio sluoksnio fraktūra pasižymėjo B1 bandinys, apdorotas vienu ėjimu (3.3 pav., a).

Ėjimų skaičiaus didinimas nuo 1 (B1 bandinys) iki 4 (B3 bandinys) neigiamai veikia apdoroto paviršiaus morfologiją – lemia bandinio paviršiaus perkaitinimą ir su juo susijusį įtrūkių susidarymą bei struktūros grublėtumo didėjimą.

C eksperimento metu lazeriu buvo visiškai apdoroti bandinių šoniniai paviršiai, siekiant nustatyti geriausius koncentruotos energijos šaltinių technologinių parametrų derinius. Atliktas bandinių paviršinio sluoksnio apdorojimas, bandiniui suteikiant pastumą dviem kryptimis, kai apdorojamas visas bandinio plotas.

Prieš lazerinį apdorojimą bandiniai nebuvo nušlifuoti. 3.5 paveiksle matoma įvedamos energijos tankio įtaka apdoroto paviršiaus topografijai, apdorojant vienu ėjimu.

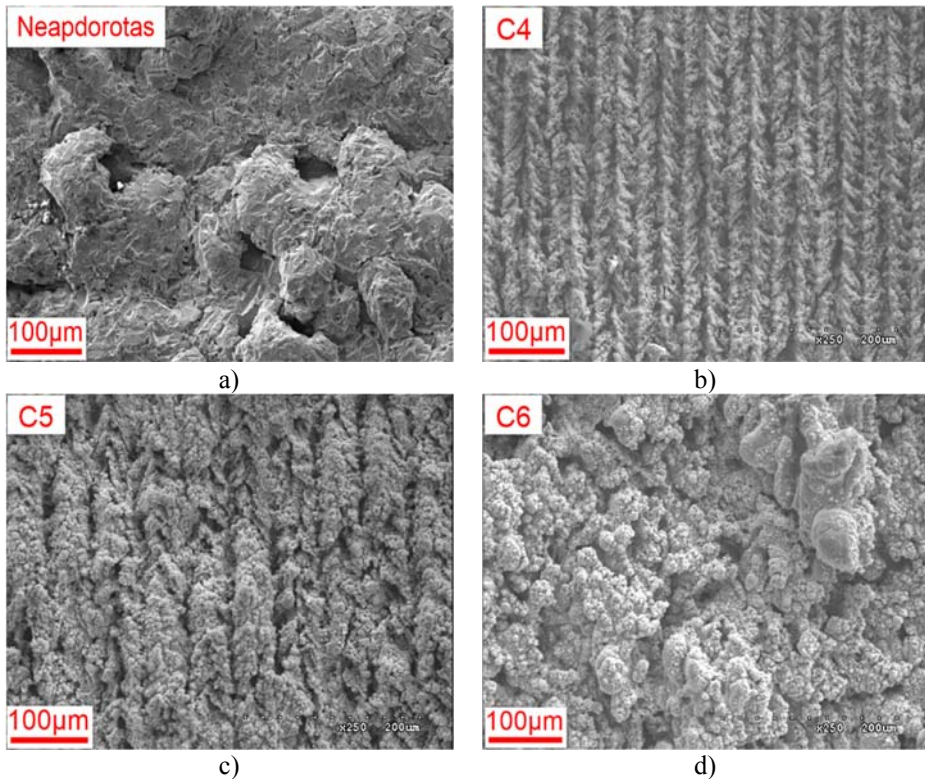


3.5 pav. C eksperimento bandinių paviršiaus topografija: a) C1; b) C4; c) C7; d) C2; e) C5; f) C8; g) C3; h) C6; i) C9

Fig. 3.5. Topographics images of the C experiment samples: a) C1; b) C4; c) C7; d) C2; e) C5; f) C8; g) C3; h) C6; i) C9

Remiantis 3.5 paveiksle vaizduojamų bandinių topografijos analize, galima išskirti tris esmines apdoroto paviršiaus faktūras: korėtas ir nepakankamai išsilydęs paviršinis sluoksnis (C3 ir C9 bandiniai), netvarkingai išgarintas paviršius su chaotiškai išsidėščiusiais iškilimais (C1, C2, C7, C8 bandiniai) ir tolygiai bei kryptingai išgarintas paviršius (C4, C5 ir C6 bandiniai). Akivaizdu, kad geriausia paviršiaus topografija susidaro esant 2,5 W lazerio spindulio pluošto galiai. Siekiant nustatyti lazerinio apdorojimo greičio įtaką, atlikta papildoma C4–C6 bandinių topografijos analizė (3.6 pav., b–d). C4 bandinio paviršiuje matomos

ryškios rievės (3.6 pav., b), kurios C5 bandinio atveju nėra taip aiškiai išreikštos (3.6 pav., c). Skirtumą lemia nuo 663 iki 265 kW/cm² sumažėjęs įvedamos energijos kiekis. C6 bandinio paviršiuje stebima korėta fraktūra ir banguotumas (3.6 pav., d), kurie atsirado dėl didelio apdorojimo greičio 5 mm/s bei nepakankamo energijos kiekio 132 kW/cm², dėl kurio sparčiau vyksta terminio poveikio zonos struktūriniai virsmai.

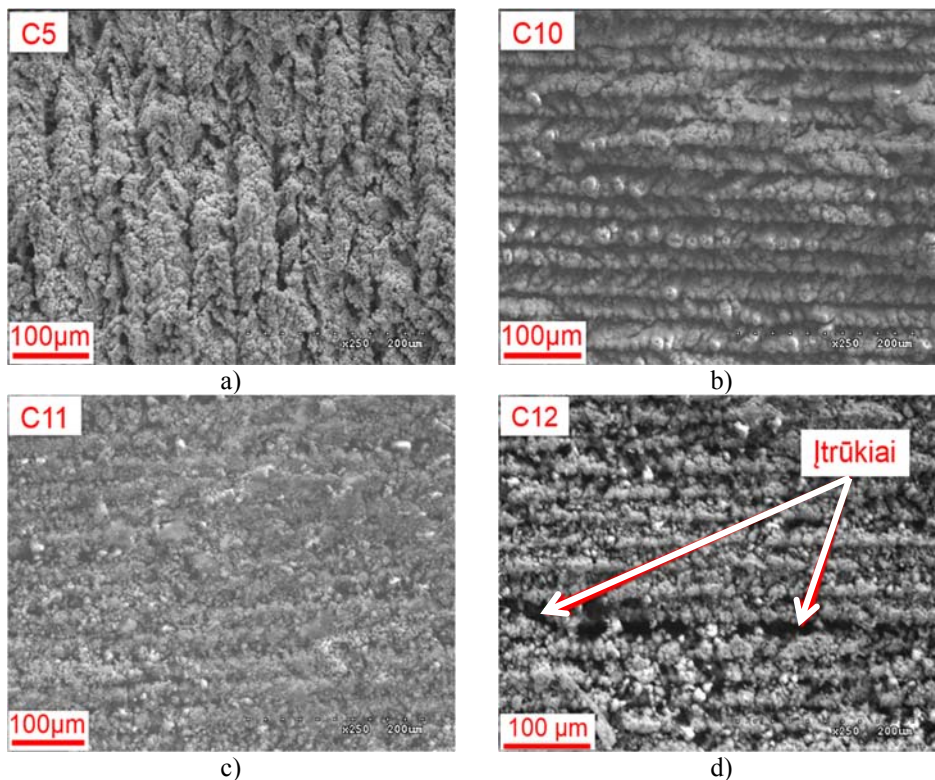


3.6 pav. C eksperimento bandinių paviršių topografija esant skirtingam lazerinio apdorojimo greičiui: a) neapdorotas; b) C4; c) C5; d) C6

Fig. 3.6. Topographics images of the different laser processing speed of the C experiment samples: a) non processed; b) C4; c) C5; d) C6

3.7 paveiksle matoma lazerinio mikroapdorojimo ėjimų skaičiaus įtaka apdoroto paviršiaus topografijai esant šiems apdorojimo parametrams: $P = 2,5$ W; $V = 2,5$ mm/s. Sukepintą miltelinio pagrindo paviršių apdorojant vienu ėjimu (C5 bandinys), matomas netolygiai išgarintas plonas sukepintas sluoksnis (3.7 pav., a), ėjimų skaičių padidinus iki 2, bandinio paviršiuje matomos kryptingai susiformavusios rėvos, kurios neigiamai veikia paviršiaus profilometrijos

rodiklius (C10 bandinys). Papildomos energijos įvedimas, paviršių apdirbant keturiais ėjimais, lemia padidintą sukepinto sluoksnio išgarinimą (C11 bandinys) bei vidutinio mikronelygumų aukščio sumažėjimą. Lazerinio apdorojimo ėjimų skaičių padidinus iki 6, C12 bandinyje stebimi įtrūkiai. Defektų atsiradimą lemia perteklinis apdorojamo paviršiaus perkaitinimas bei vidiniai įtempiai.



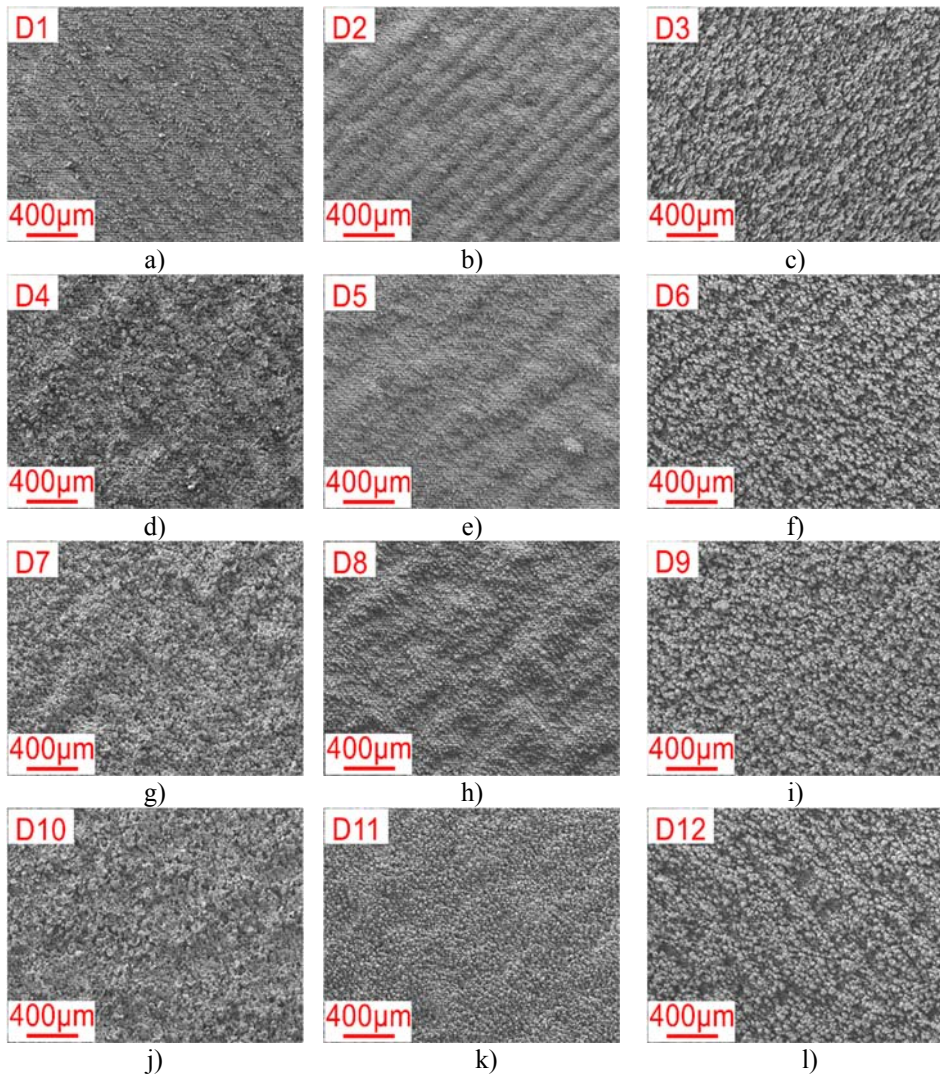
3.7 pav. C eksperimento bandinių paviršių topografija esant skirtingam lazerinio apdorojimo ėjimų skaičiui: a) C5; b) C10; c) C11; d) C12

Fig. 3.7. The topography of the surface of samples in the experiment C at different numbers of laser processing passes: a) C5; b) C10; c) C11; d) C12

C eksperimento topografijos analizė parodė, kad geriausiu lazerinio garinimo rezultatu pasižymėjimo C11 bandinys, kai $P = 2,5$ W, $V = 2,5$ mm/s ir $n = 4$.

D eksperimento metu lazeriu buvo visiškai apdoroti bandinių viršutiniai paviršiai, siekiant nustatyti geriausius koncentruotosios energijos šaltinių technologinių parametų derinius. Atliktas bandinių paviršinio sluoksnio apdorojimas, bandiniui suteikiant pastumą dviem kryptimis, kai apdirbamas visas bandinio

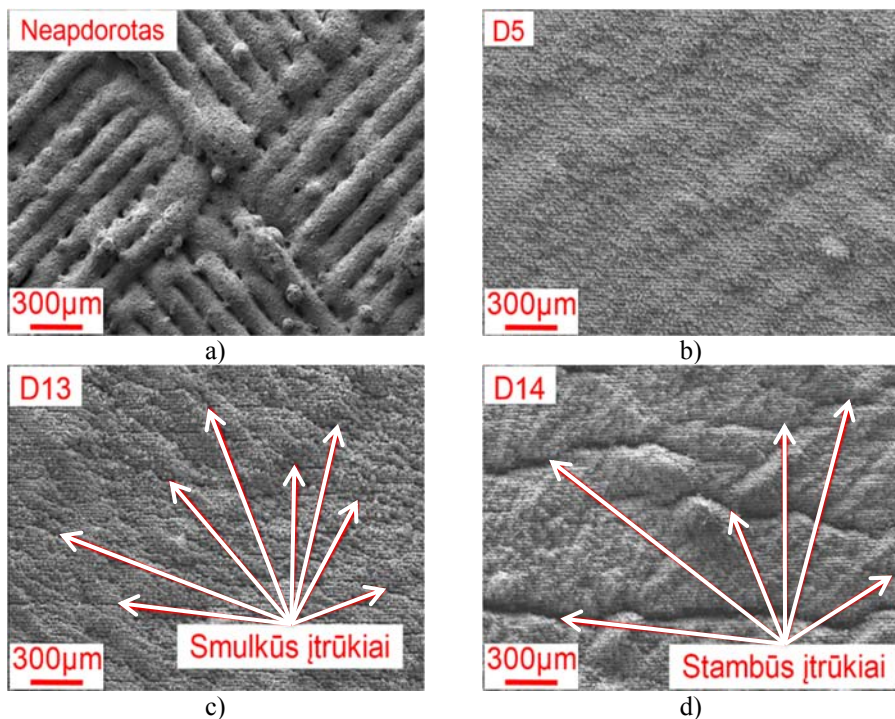
plotas. Prieš lazerinį apdorojimą bandiniai nebuvo šlifuoti. 3.8 paveiksle matoma įvedamos energijos įtaka apdoroto paviršiaus topografijai, apdorojant vienu ėjimu.



3.8 pav. D eksperimento bandinių paviršių topografija: a) D1; b) D2; c) D3; d) D4; e) D5; f) D6; g) D7; h) D8; i) D9; j) D10; k) D11; l) D12

Fig. 3.8. The topography of the surface of specimens in the experiment D: a) D1; b) D2; c) D3; d) D4; e) D5; f) D6; g) D7; h) D8; i) D9; j) D10; k) D11; l) D12

Atliekant topografinę D eksperimento bandinių analizę, galima pastebėti (3.8 pav.), kad bandinių paviršiuje lazerinio apdorojimo metu formuojasi šešios būdingos paviršiaus fraktūros: smulkios rievės (D1 bandinys); korėta banguota fraktūra (D4, D7, D10 bandiniai); stambios rievės (D2 bandinys); banguotumas (D5, D8 bandiniai); smulki korėta fraktūra (D11 bandinys), vidutinė korėta fraktūra (D3, D6, D9, D12 bandiniai). Apdoroto bandinio paviršiuje susiformavusios smulkios bei stambios rievės, korėtumas neigiamai veikia paviršiaus profilometrijos rodiklius, todėl išsamesnė bandinių, pasižyminčių šiais defektais, topografinė analizė neturi prasmės. Lazerinio mikroapdorojimo poveikio apdorotam bandinio paviršiui panašumas matomas nagrinėjant D5 ir D8 bandinių topografinius vaizdus. Tačiau dėl didesnio paviršiaus banguotumo D8 bandinyje geriausių lazeriniu garinimu pasižymėjo D5 bandinys. Tikėtina, kad efektyviausiu lazeriniu apdorojimu pasižymės bandiniai, apdoroti 2,5 mm/s greičiu.



3.9 pav. D eksperimento bandinių paviršių topografija esant skirtingam lazerinio apdorojimo ėjimų skaičiui: a) neapdorotas; b) D5; c) D13; d) D14

Fig. 3.9. The topography of the surface of specimens in the experiment D at different numbers of laser processing passes: a) non processed; b) D5; c) D13; d) D14

3.9 paveiksle matomas ėjimų skaičiaus poveikis apdoroto paviršiaus topografijai esant šiems apdorojimo parametrams: $P = 2,5 \text{ W}$; $V = 2,5 \text{ mm/s}$. Papildomos energijos įvedimas, paviršių apdorojant dviem ėjimais, lemia smulkių įtrūkių atsiradimą (D13 bandinys). Ėjimų skaičių padidinus iki 4 (D14 bandinyje), susiformuoja stambūs įtrūkiai. D13 ir D14 bandinių defektų atsiradimo mechanizmas tiesiogiai susijęs su įvedamos šilumos kiekiu bei kristalizacijos virsmis. Įtrūkiai apdirbamo ploto paviršiuje nėra leistini, todėl apdirbant viršutinį sukepintą bandinio paviršių, ėjimų skaičiaus didinimas yra neracionalus.

3.2. Profilometrijos analizė

Darbe nagrinėjami A, B, C ir D eksperimentų bandinių profilometrijos rezultatai. Prieš atliekant lazerinio mikroapdorojimo parametrų įtakos sukepintų bandinių paviršiams analizę, buvo atlikti neapdorotų viršutinio ir šoninio paviršių vidutinio mikronelygumų aukščio matavimai.

Sukepinto, nepdoroto šoninio paviršiaus vidutinis šiurkštumas siekia $R_a = 9,2 \text{ }\mu\text{m}$, tuo tarpu viršutinio paviršiaus šiurkštumas $R_a = 17,9 \text{ }\mu\text{m}$. Skirtumą lemia technologiniai selektyviojo lazerinio sukepinimo proceso ypatumai. Aki-vaizdu, kad viršutinio ir šoninio sukepinto paviršiaus lazerinio apdorojimo eiga bei galutinio darbo rezultatas gali būti skirtingi. Todėl tikslinga atlikti abiejų viršutinio ir šoninio-paviršių tyrimą.

Siekiant parinkti optimalius sukepintų bandinių lazerinio mikroapdorojimo parametrus, pirmame tyrimų etape buvo atliktas sukepintų ir nupoliruotų bandinių apdorojimas lazeriu. Buvo atlikta A ir B serijos apdorotų bandinių profilometrijos analizė ir pamatuotos vidutinės bandinių paviršiaus šiurkštumo reikšmės.

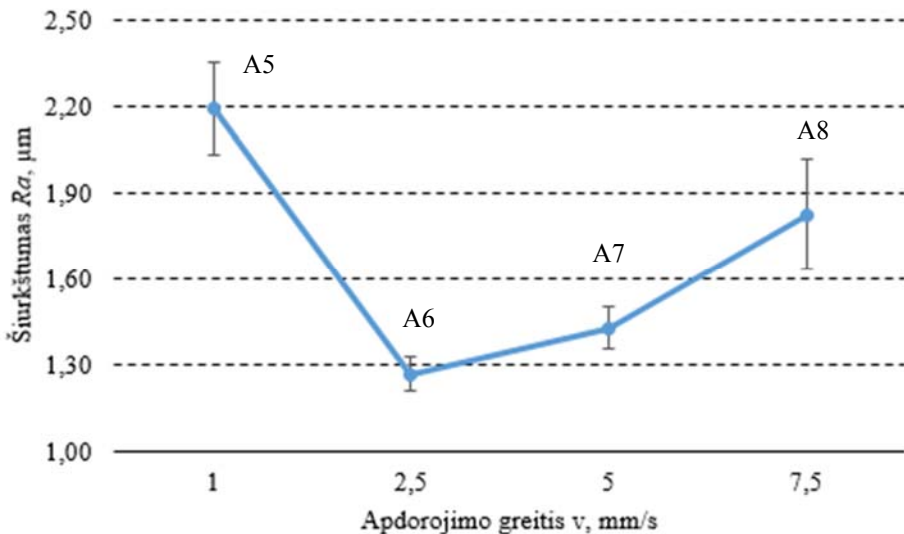
Atliekant kokybinę paviršiaus morfologijos analizę, buvo nustatyta, kad esant $2,5 \text{ W}$ apdorojimo galiai bei apdorojimo greičiui nuo 1 iki $7,5 \text{ mm/s}$ galima tikėtis geresnių šiurkščio rezultatų (A5–A8 bandiniai). Šioje serijoje greitis buvo nuosekliai didinamas nuo 1 iki $7,5 \text{ mm/s}$, išlaikant pastovius kitus parametrus. Gauti šių bandinių šiurkščio matavimo rezultatai leidžia įvertinti lazerinio apdorojimo greičio poveikį paviršiaus šiurkščiui (3.10 pav.). Toliau yra pateikiami šių bandinių paviršiaus profilometrijos rezultatai.

A eksperimento (A5–A8 bandinių) profilometrijos rezultatai.

A eksperimento profilometrijos rezultatų analizė rodo (3.10 pav.), kad didžiausias apdoroto paviršiaus šiurkštumas $R_a = 2,2 \text{ }\mu\text{m}$ (bandinys A5) yra esant 1 mm/s apdorojimo greičiui. Tai lemia perteklinis paviršiaus įkaitinimas (E3 įvedamos energijos lygmuo) ir besiformuojantys įtrūkiai. Esant $2,5 \text{ mm/s}$ apdorojimo greičiui (E2 įvedamos energijos lygmuo), stebimas mažiausias apdoroto paviršiaus šiurkštis $R_a = 1,27 \text{ }\mu\text{m}$ (A6 bandinys). Mažą šiurkštumą lemia tai, kad

apdoroto takelio paviršiuje nėra įtrūkių bei terminio poveikio zonoje stebimas mažas ištaškymas (3.2 pav., b). Nuoseklus apdorojimo greičio didinimas iki 5 bei 7,5 mm/s neigiamai veikia apdoroto paviršiaus profilometriją, vidutinis mikronelygumų aukštis $R_a = 1,43 \mu\text{m}$ (A7 bandinys) bei atitinkamai $R_a = 1,83 \mu\text{m}$ (A8 bandinys). Tolygų šiurkštumo didėjimą nuo $R_a = 1,27 \mu\text{m}$ (A6 bandinys) iki $R_a = 1,43 \mu\text{m}$ (A7 bandinys) lemia padidėjęs metalo ištaškymas (3.2 pav.) bei stambios tuštumos bandinio paviršiuje, matomos 3.1 paveiksle. Šiurkštumo didėjimą nuo $R_a = 1,43 \mu\text{m}$ (A7 bandinys) iki $R_a = 1,83 \mu\text{m}$ (A8 bandinys) lemia susiformavusios rievės apdoroto takelio paviršiuje (3.2 pav.).

A eksperimento tyrimo metu nustatyta, kad A6 bandinys pasižymi mažiausiu šiurkštumu $R_a = 1,27 \mu\text{m}$ dėl mažo išgarinto tūrio ištaškymo terminio poveikio zonoje (3.2 pav., b) bei mažesnių apdoroto paviršiaus mikronelygumų (3.1 pav., e).



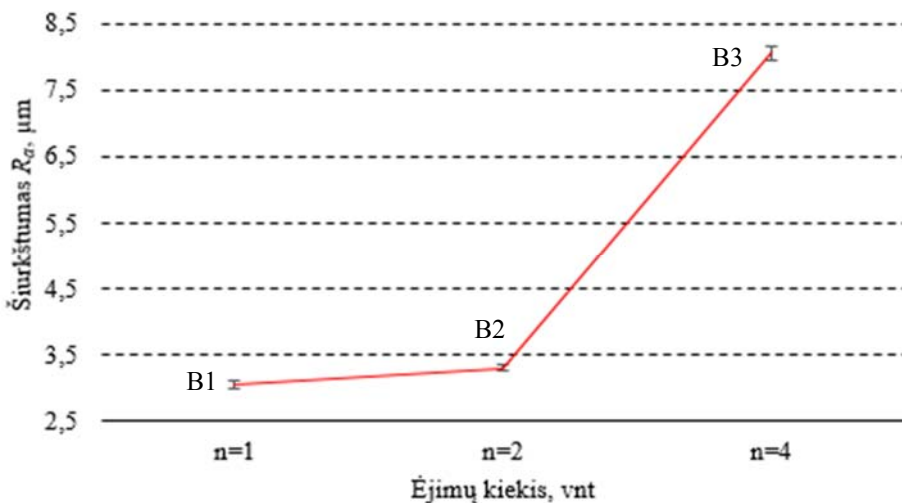
3.10 pav. A eksperimento bandinių šiurkščio priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio

Fig. 3.10. The specimens' profilometry dependence on the laser processing speed in the experiment A

B eksperimento (B1–B3 bandinių) profilometrijos rezultatai.

B eksperimento profilometrijos rezultatų analizė parodė (3.11 pav.), kad mažiausią paviršiaus šiurkštumą turi B1 bandinys, apdorotas vienu ėjimu, o R_a siekia $3,04 \mu\text{m}$. Ėjimų skaičių padidinus iki dviejų, vidutinis mikronelygumų aukštis padidėja iki $R_a = 3,3 \mu\text{m}$ (B2 bandinys), o šiurkštumo padidėjimą lemia paviršiuje besiformuojantys įtrūkiai, kurie yra matomi 3.4 pav., a. Didinant su-

kepinto bandinio lazerinio mikroapdorojimo ėjimų skaičių iki 4, bandinio paviršiuje atsiranda banguotumas (3.4 pav., b), o šiurkštumas padidėja iki $R_a = 8,05 \mu\text{m}$ (B3 bandinys).



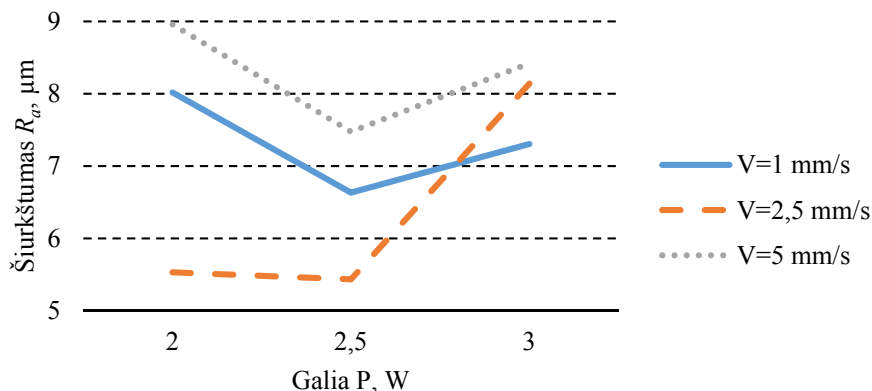
3.11 pav. B eksperimento bandinių šiurkščio priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo ėjimų skaičiaus

Fig. 3.11. The specimens' profilometry dependence on the number of passes of laser processing in the experiment B

C eksperimento (C1–C12 bandinių) profilometrijos matavimo rezultatai.

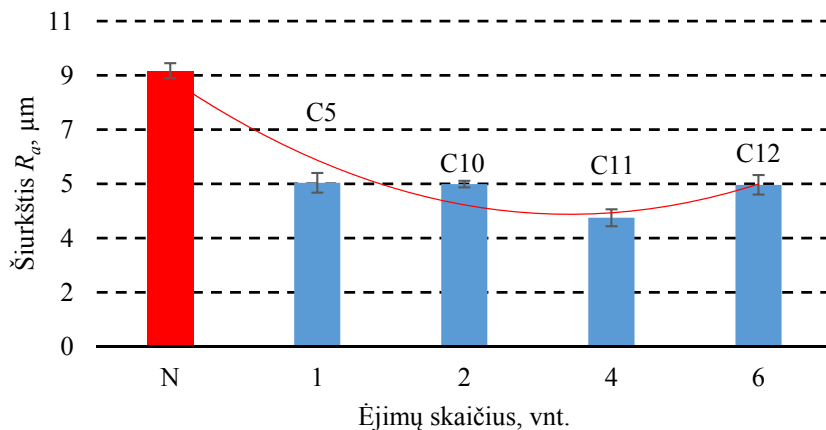
Mikroskopijos tyrimo metu nustatyta, kad Fe-Ni-Co miltelių pagrindu sukepintam ir papildomai neapdorotam šoniniam paviršiui būdingas skirtingos krypties didelis paviršiaus netolygumas (2.3 pav., a). Bandinio paviršiuje formuojasi ryškūs, išgaubti aplydymo sluoksniai, o šoninio paviršiaus šiurkštis siekia $R_a = 9,2 \mu\text{m}$. Bandinių paviršiaus profilometrijos tyrimais nustatyta, kad esant E2 įvedamos energijos lygmeniui, kai lazerio spindulio pluošto galia 2,5 W, stebimos mažiausios apdoroto paviršiaus mikronelygumų aukščio reikšmės (3.12 pav.). Esant 2W (E1 įvedamos energijos lygmuo) bei 3W (E3 įvedamos energijos lygmuo) lazerio spindulio pluošto apdorojimo galiai stebimas apdoroto paviršiaus vidutinio mikronelygumo aukščio padidėjimas lyginant su E2 įvedamos energijos lygmeniu. Mažiausia C eksperimento bandinių paviršiaus šiurkštumo reikšmė $R_a = 5,43 \mu\text{m}$ (C5 bandinys), apdorojant vienu ėjimu, yra pasiekta esant E2 įvedamos energijos lygmeniui, kai apdorojimo galia 2,5 W, o ėjimų skaičius $n = 1$. Esant E2 įvedamos energijos lygmeniui formuojasi palankiausias garinimo bei terminių procesų sąlygos vykdant lazerinį mikroapdorojimą.

Tyrimų metu nustatyta, kad sukepinto ir neapdoroto šoninio paviršiaus šiurkštis $R_a = 9,2 \mu\text{m}$ (3.13 pav.). Šoninį sukepintą paviršių apdorojus vienu ėjimu, vidutinis mikronelygumų aukštis sumažėjo apie 50 %.



3.12 pav. C eksperimento bandinių šiurkščio priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo galios esant skirtingam apdorojimo greičiui

Fig. 3.12. The specimens' profilometry dependence on the power of laser processing at different speeds of the processing in the experiment C



3.13 pav. C eksperimento bandinių šiurkščio priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo ėjimų skaičiaus

Fig. 3.13. The specimens' profilometry dependence on the number of passes of laser processing in the experiment C

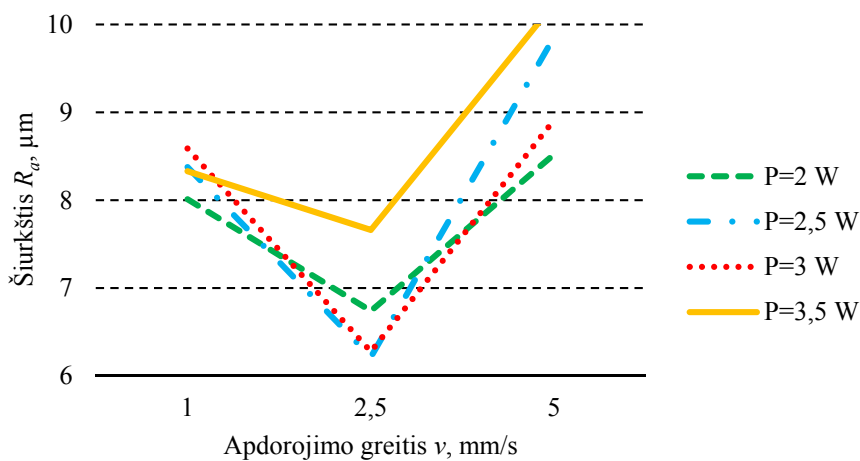
Lazerinio mikroapdorojimo ėjimų skaičiaus didinimas nuo 1 iki 2 neturėjo pastebimo poveikio paviršiaus profilometrijos rodikliams ir vidutinė šiurkštumo vertė išliko beveik nepakitusi ($R_a = 5,4 \mu\text{m}$).

Ėjimų skaičių padidinus iki 4, stebimas bandinio paviršiaus šiurkštumo sumažėjimas iki $R_a = 4,27 \mu\text{m}$. Šiurkštumo pokytį, kai ėjimų skaičius didinamas nuo 1 iki 4, lemia papildomas apdorojamo paviršiaus mikronelygumų viršūnių išgarinimas. Dar labiau padidinus ėjimų skaičių iki 6 (C12 bandinys), bandinio paviršiuje formuojasi įtrūkiai (3.7 pav., d), o vidutinis mikronelygumų aukštis padidėja iki $R_a = 5,37 \mu\text{m}$. Tai lėmė metalo paviršiaus perkaitinimas bei šiluminių procesų pokytis.

Mažiausia lazeriu apdoroto sukepinto šoninio paviršiaus šiurkštumo vertė $R_a = 4,27 \mu\text{m}$ (C11 bandinys) buvo pasiekta esant E2 lazerinio apdorojimo įvedamos energijos lygmeniui, apdirbant keturiais ėjimais.

D eksperimento (D1–D14 bandinių) profilometrijos matavimo rezultatai.

Mikroskopijos tyrimo metu nustatyta, kad Fe-Ni-Co miltelių pagrindu sukepintam ir papildomai neapdorotam viršutiniam paviršiui būdinga dėsningai susiformavusi kryptinga struktūra (2.3 pav., b). Bandinio paviršiuje formuojasi ryškūs išgaubti aplydymo sluoksniai, o paviršiaus šiurkštis siekia $R_a = 17,9 \mu\text{m}$.



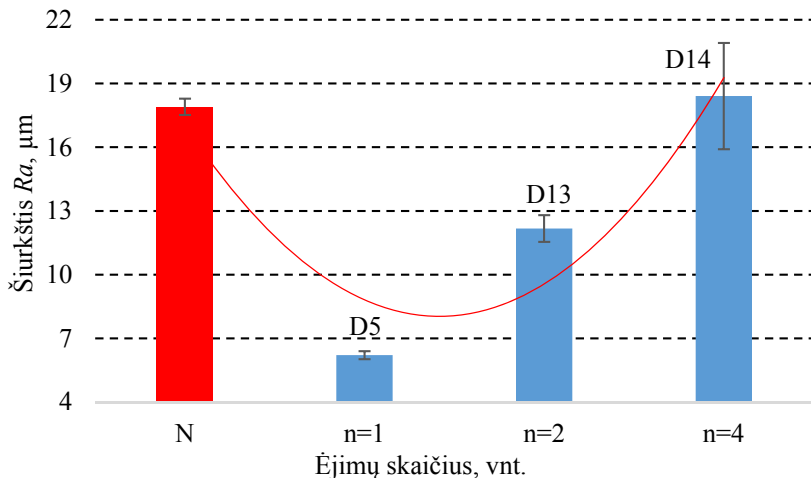
3.14 pav. D eksperimento bandinių šiurkščio priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio esant skirtingai apdorojimo galiai

Fig. 3.14. The specimens' profilometry dependence on the laser processing speed at different levels of power of laser processing in the experiment D

Sukepintų ir lazeriu apdorotų bandinių paviršiaus profilometrijos rezultatai parodė, kad lazerinis mikroapdorojimas vienu ėjimu, taikant 2–3,5 W pluošto

galią ir 1 mm/s apdorojimo greitį (t. y. režimus, atitinkančius E3 įvedamos energijos lygmenį), leidžia sumažinti paviršiaus šiurkštį daugiau kaip dvigubai, lyginant su sukepintu ir papildomai neapdorotu paviršiumi (3.14 pav.). Padidinus apdorojimo greitį iki 2,5 mm/s (E2 įvedamos energijos lygmuo) paviršiaus šiurkščio parametras R_a sumažėjo dar labiau, o mažiausia reikšmė $R_a = 6,22 \mu\text{m}$ nustatyta esant 2,5 W lazerio spindulio pluošto galiai (D5 bandinys). Panašus lazerio apdoroto paviršiaus šiurkštumo rezultatas pasiektas esant 3 W. Toliau padidinus apdorojimo greitį iki 5 mm/s ir, atitinkamai, perėjus į E1 įvedamos energijos lygmens sritį, stebimas ryškus šiurkščio rodiklių padidėjimas.

Tyrimų metu buvo nustatyta, kad esant lazerio spindulio pluošto energijos ir apdorojimo greičio deriniams, užtikrinantiems E2 lazerinio apdorojimo įvedamos energijos lygmenį, susidaro palankiausios bandinio paviršiaus medžiagos garinimo sąlygos ir formuojasi mažiausias paviršiaus šiurkštis.



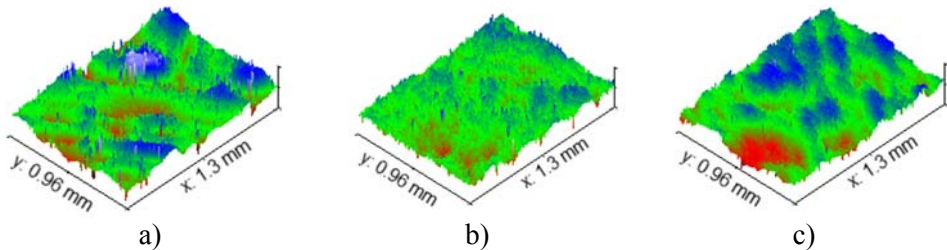
3.15 pav. D eksperimento bandinių šiurkščio priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo ėjimų skaičiaus

Fig. 3.15. The specimens' profilometry dependence on the the number of passes of laser processing in the experiment D

Tyrimų metu nustatyta, kad sukepinto ir neapdoroto viršutinio paviršiaus šiurkštis $R_a = 17,9 \mu\text{m}$. Viršutinį sukepintą paviršių apdorojus vienu ėjimu, esant pluošto galiai $P = 2,5 \text{ W}$ ir 2,5 mm/s apdorojimo greičiui, vidutinis mikronelygumų aukštis sumažėjo apie 60 % (D5 bandinys). Ėjimų skaičiaus didinimas iki 2 daro neigiamą įtaką paviršiaus šiurkštumui (3.15 pav.), sukepintų ir lazeriu apdorotų bandinių paviršiaus šiurkštumas padidėja dvigubai nuo $R_a = 6,22 \mu\text{m}$

(D5 bandinys) iki $R_a = 12,17 \mu\text{m}$ (D13 bandinys). Lazerinio mikroapdorojimo ėjimų skaičiaus didinimas iki 4 kartų, skatina tolesnį šiurkštumo didėjimą iki $R_a = 18,41 \mu\text{m}$ (D14 bandinys). Šiurkštumo rodiklių padidėjimą lemia perteklinis apdorojamo paviršiaus kaitinimas ir įtrūkių paviršiuje formavimosi procesas.

D eksperimento lazeriu apdorotų bandinių topografiją bei paviršinio sluoksnio mikronelygumų aukštis buvo įvertintas taikant ne tik kontaktinės, bet ir optinės 3D profilometrijos metodą.



3.16 pav. D eksperimento bandinių 3D profilometrijos rezultatai:

a) neapdorotas; b) D5; c) D13

Fig. 3.16. 3D profilometry results of the D experiment samples

a) non processed; b) D5; c) D13

3.16 paveiksle pateikti bandinių paviršiaus 3D topografiniai vaizdai iš esmės patvirtino šiurkščio tyrimo rezultatus. Sukepinto ir lazeriu neapdoroto bandinio (N) paviršiuje, kurio paviršiaus topografiją lėmė SLS proceso ypatumai, matomi daugybiniai aukšti iškilimai, paviršius pasižymi išreikštu banguotumu (3.16 pav., a). Mažiausiu šiurkštumo R_a parametru pasižymintis D5 bandinio paviršius yra vienalytis. Topografiniame 3D vaizde jis atrodo lygus, be didelių iškilimų ar įdubimų. Ėjimų skaičiaus didinimas iki 2 lemia pasikartojančių apdoroto paviršiaus iškilimų ir įdubimų atsiradimą (D13 bandinys).

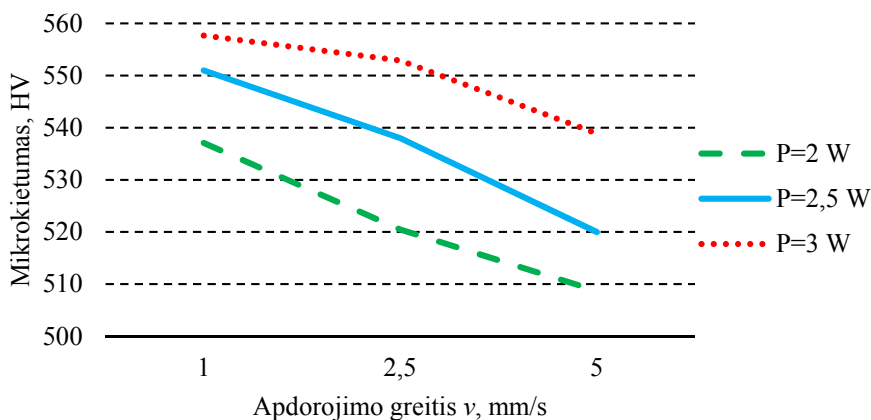
Atliekant tiriamąją bandinių paviršiaus profilometrinę analizę nustatyta, kad nepriklausomai nuo konkrečių pluošto galios ir apdorojimo greičio parametrų reikšmių, jų deriniai, užtikrinantys E2 įvedamos energijos lygmenį, leidžia pasiekti mažiausias apdoroto paviršiaus šiurkštumo reikšmes. Mažiausia D eksperimento šiurkštumo vertė $R_a = 6,22 \mu\text{m}$ pasiekta esant E2 lazerinio mikroapdorojimo įvedamos energijos lygmeniui, kai apdorojimo galia buvo $P = 2,5 \text{ W}$, o lazerinio mikroapdorojimo greitis $v = 2,5 \text{ mm/s}$. Taip pat nustatyta, kad lazerinis mikroapdorojimas daugiau kaip vienu ėjimu yra neracionalus, kadangi, atliekant papildomus apdorojimų ėjimus, paviršius yra perkaitinamas ir pasižymi didesniu šiurkštumu.

3.3. Mikrokietumo analizė

Darbe buvo atlikti C ir D eksperimentų bandinių paviršiaus mikrokietumo tyrimai.

Morfologijos bei profilometrijos rezultatai parodė, kad Fe-Ni-Co miltelių pagrindu sukepinto metalo viršutinis bei šoninis paviršiai pasižymi skirtingu paviršinio sluoksnio reljefu ir skirtingu šiurkščiu. Dėl to koncentruotosios energijos šaltinio pluošto ir sukepintos medžiagos sąveikos vietoje gali vykti skirtingi fizikiniai bei cheminiai procesai. Todėl būtina ištirti abiejų C ir D etapų lazериu apdorotų sukepintų paviršių mikrokietumą.

C eksperimento (C1–C12 bandinių) mikrokietumo matavimo rezultatai.



3.17 pav. C eksperimento bandinių mikrokietumo priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio esant skirtingai apdorojimo galiai

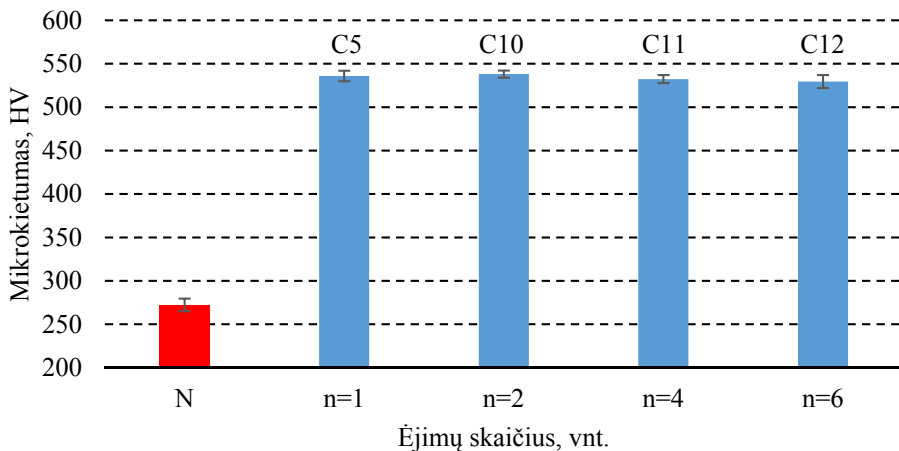
Fig. 3.17. The dependence of the microhardness of specimens on laser processing speed at different levels of power in the experiment C

Lazerinio mikroapdorojimo metu spinduliuote paveikto paviršiaus mikrokietumą gali lemti: užgrūdinto sluoksnio gylis, paviršiaus mikrostruktūra, intermetaliniai junginiai ir oksidų koncentracija (Martinez *et al.* 2017; Martinez *et al.* 2012; Bouquet *et al.* 2016). Tyrimo metu nustatyta, kad užgrūdinto sluoksnio gylis mažesnis negu $35\ \mu\text{m}$. Analogiškas užgrūdinto sluoksnio gylio nustatymo būdas, kuris remiasi bandinio skersinio pjūvio mikrokietumo bei struktūros vertinimu, pateiktas (Martinez *et al.* 2017; Bouquet *et al.* 2016).

C eksperimento mikrokietumo tyrimo metu nustatyta (3.17 pav.), kad mažinant lazerinio apdorojimo greitį ir didinant lazerio galią bei esant perėjimui nuo pirmo iki trečio įvedamos energijos lygmens sukepinto ir lazериu apdoroto sluoksnio mikrokietumas didėja. Didžiausias mikrokietumo rezultato reikšmių

skirtumas tarp bandinių apdorotų 2–3 W galiomis, yra iki 10 %. Lyginant neapdoroto 297 HV ir apdorotų lazeriu bandinių kietį, skirtumas siekia iki 88 %. Didžiausia lazerinio apdorojimo kietumo reikšmė 558 HV (C7 bandinys) pasiekta esant E3 lazerinio apdorojimo įvedamos energijos lygmeniui, kai $P = 3,5$ W, $V = 1$ mm/s ir apdirbant vienu ėjimu (3.17 pav.).

Tyrimų metu nustatyta, kad lazerinio mikroapdorojimo ėjimų skaičiaus didinimas praktiškai neturėjo poveikio sukepintos medžiagos mikrokietumo rodikliams (3.18 pav.).



3.18 pav. C eksperimento bandinių mikrokietumo priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo ėjimų skaičiaus

Fig. 3.18. The dependence of the microhardness of specimens on laser processing speed at different numbers of laser processing passes in the experiment D

C eksperimento bandinių mikrokietumo analizė parodė, kad apdirbant lazerio spinduliuote sukepintą šoninį paviršių stebima bendra tendencija, kai didžiausios paviršinio sluoksnio metalo mikrokietumo reikšmės pasiektos esant E3 lazerinio apdorojimo įvedamos energijos lygmeniui.

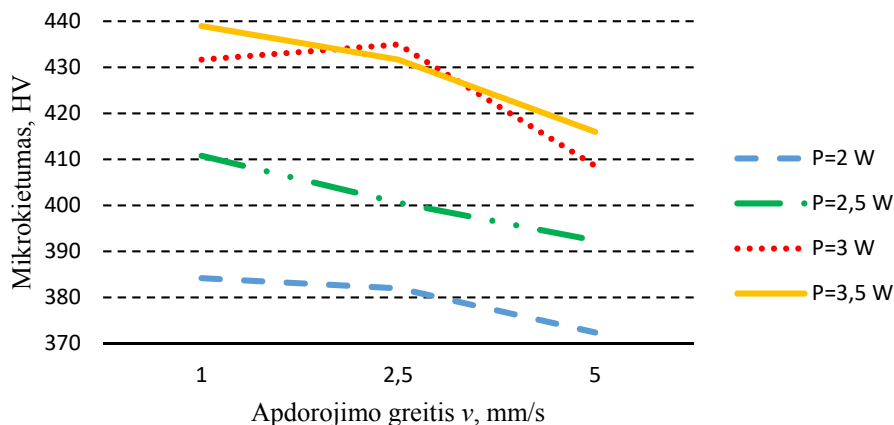
D eksperimento (D1–D14 bandinių) mikrokietumo matavimo rezultatai.

D eksperimento mikrokietumo tyrimo metu nustatyta (3.19 pav.), kad didinant lazerinio apdorojimo įvedamos energijos kiekį (esant perėjimui nuo pirmo iki trečio įvedamos energijos lygmens) sukepinto ir lazeriu apdoroto sluoksnio mikrokietumas didėja kaip ir C eksperimento atveju.

Lyginant neapdoroto 297 HV ir apdorotų lazeriu bandinių kietį, skirtumas siekia iki 48 %. Didžiausia mikrokietumo reikšmė 439 HV (D10 bandinys) pasiekta esant E3 lazerinio apdorojimo įvedamos energijos lygmeniui, kai $P = 3,5$ W, $V = 1$ mm/s ir apdorojant vienu ėjimu (3.19 pav.). Didžiausias mikrokietumas

tumo rezultato reikšmių skirtumas tarp bandinių, apdorotų 2 ir 2,5 W galiomis siekia, 10,5 %, o tarp bandinių apdorotų, 2,5 ir 3 W galiomis, siekia 12 %. Toliau lazerinio apdorojimo galios didinimas neturi teigiamo poveikio sukepinto ir lazeriu apdoroto metalo mikrokietumui, o didžiausias mikrokietumo rezultato reikšmių skirtumas tarp bandinių, apdorotų 3 ir 3,5 W galiomis ir esant tam pačiam apdorojimo greičiui yra tik 1,6 %. Tai rodo, kad bandinių lazerinio apdorojimo galios didinimas nuo 3 iki 3,5 W galios neturi žymios įtakos apdoroto metalo mikrostruktūrai, fazinei ir cheminei sudėčiai.

Tyrimų metu nustatyta, kad lazerinio mikroapdorojimo ėjimų skaičiaus didinimas neigiamai paveikė lazeriu apdorotų bandinių topografiją bei šiurkštį, todėl nėra prasminga tirti šių bandinių metalo mikrokietumo.



3.19 pav. D eksperimento bandinių mikrokietumo priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio esant skirtingai apdorojimo galiai

Fig. 3.19. The dependence of the microhardness of specimens on laser processing speed in the experiment D at different levels of power

3.4. Dilimo analizė

Darbe nagrinėjamas C ir D eksperimentų serijos bandinių atsparumas dilimui.

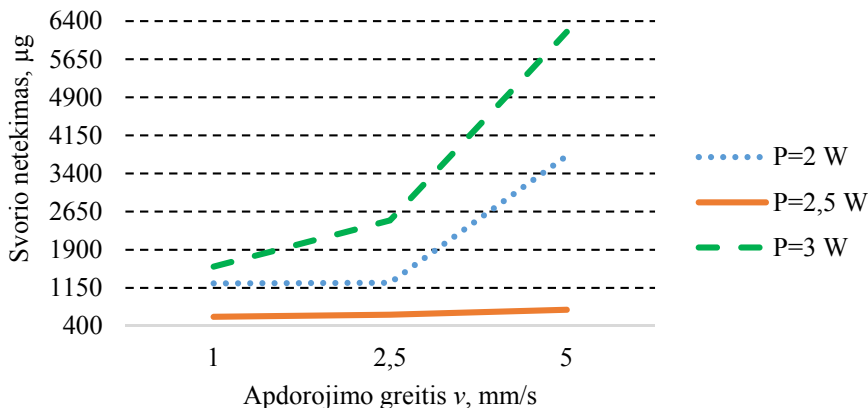
Tyrimams naudojama Fe-Ni-Co miltelių pagrindu sukepinta medžiaga dažnai taikoma polimerų liejimo įrangos gamyboje. Eksploatuojant liejimo formas dėl temperatūrinio poveikio paviršinio sluoksnio metalui bei plastiko tekėjimo įrangos sukepintu paviršiumi labai svarbios yra eksploatacinės gaminio charakteristikos. Vienas iš pagrindinių rodiklių, nurodančių plastiko liejimo formas

eksploatacijos laiką, – tai darbinių dalių (paviršių) geometrinių rodiklių stabilumas viso įrangos eksploatacijos metu.

Vienas iš efektyviausių būdų metalinio paviršiaus, dirbančio trinties poroje, eksploatacinėms charakteristikoms patikrinti yra atsparumo dilimui bandymas.

C eksperimento (C1–C12 bandinių) atsparumo dilimui tyrimo rezultatai.

Siekiant įvertinti sukepintų bandinių šoninių paviršių atsparumą dilimui po lazerinio mikroapdorojimo, buvo pasirinkta „pin on plate“ dilimo schema.

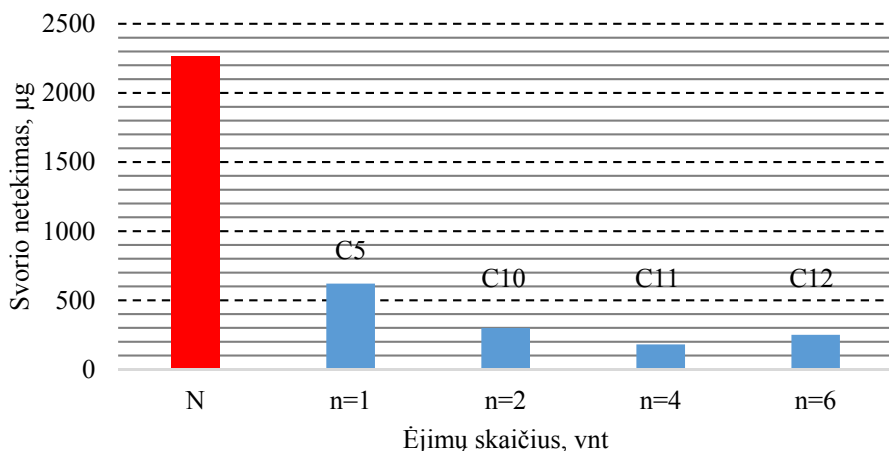


3.20 pav. C eksperimento bandinių svorio netekimo priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio esant skirtingai apdorojimo galiai

Fig. 3.20. The dependence of specimen mass loss on laser processing speed in the experiment C at different levels of power

Tyrimo metu nustatyta, kad neapdoroto šoninio paviršiaus svorio netekimas siekia 2270 µg. Po lazerinio sukepinto šoninio paviršiaus mikroapdorojimo, kai ėjimų skaičius $n = 1$ (C5 bandinys), svorio netekimas siekia 620 µg (3.21 pav.). Bandinių svorio netekimo skirtumą iki 3,5 karto tarp sukepinto ir sukepinto bei lazerio spinduliuote apdoroto bandinio lemia SLS būdu suformuoto paviršiaus topografijos ypatumai ir paviršinio metalo sluoksnio mechaninių savybių pokyčiai. Lazerinio mikroapdorojimo ėjimų skaičiaus didinimas nuo 2 iki 4 lėmė (C10 ir C11 bandinių) svorio netekimo mažėjimą iki 300 ir 180 µg atitinkamai. Papildomas sukepinto paviršiaus lazerinis mikroapdorojimas, kai ėjimų skaičius n buvo didinamas nuo 2 iki 4, mažina C serijos bandinių paviršiaus mikronelygumų reikšmes, o tai teigiamai veikia bandinio svorio netekimo rodiklius. Lazerinio apdorojimo ėjimų skaičiaus didinimas nuo 4 iki 6 lėmė sukepinto paviršiaus perkaitinimą, susiformavo įtrūkiai (3.7 pav., d), dėl to tiriamųjų bandinių svorio netekimas padidėjo apie 68 % (C12 bandinys).

Mažiausias bandinio svorio netekimas 180 μg (C11 bandinys) buvo pasiektas esant E2 įvedamos energijos lygmeniui (kai $P = 2,5 \text{ W}$, $V = 2,5 \text{ mm/s}$) ir apdirbant keturiais ėjimais (3.21 pav.). Šiuo atveju mažiausią svorio netekimą lėmė mažiausia bandinio C11 paviršiaus vidutinio mikronelygumų aukščio reikšmė $R_a = 4,27 \mu\text{m}$.



3.21 pav. C eksperimento bandinių svorio netekimo priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo ėjimų skaičiaus

Fig. 3.21. The dependence of specimen mass loss on number of laser processing passes in the experiment C

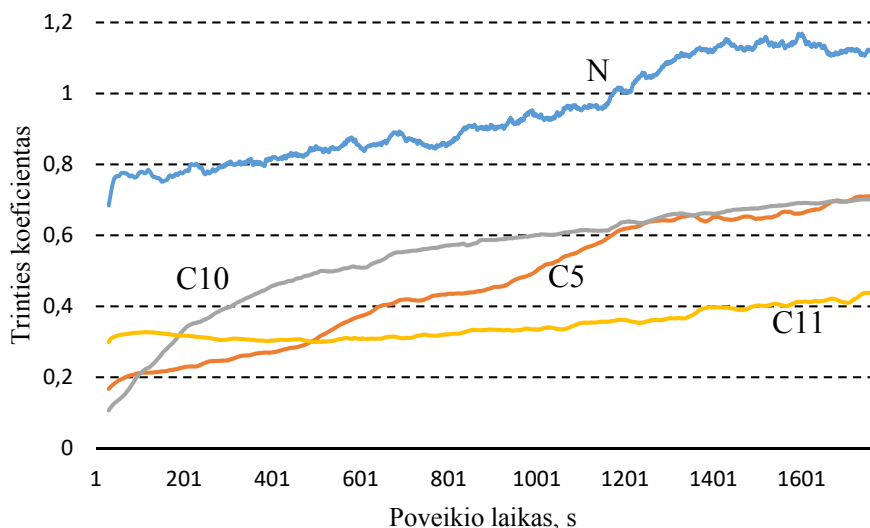
Lazerio spinduliuote apdorojant sukepintą šoninį paviršių, pasireiškia bendra tendencija, kai mažiausi bandinio masės nuostoliai stebimi esant E3 lazerinio apdorojimo įvedamos energijos lygmeniui (3.20 pav.).

Tai lėmė didėjantis įvedamos šilumos kiekis, apdorojimo greičiui mažėjant nuo 5 iki 1 mm/s ir didžiausias metalo paviršiaus mikrokietumas.

C eksperimento bandinių atsparumo dilimui tyrimo metu nustatyta, kad lazerinio apdorojimo ėjimų skaičiaus didinimas iki 6 didina bandinių svorio praradimą iki 250 μg (C12 bandinys), čia dėl padidėjusio šilumos įvedimo, bandinio paviršiuje formuojasi įtrūkiai (3.7 pav., d), kurie neigiamai veikia masės nuostolių rodiklius.

Siekiant nustatyti lazerinio mikroapdorojimo ėjimų skaičiaus įtaką apdoroto paviršiaus eksploatacinėms charakteristikoms, buvo atliktas bandinių trinties koeficiento verčių palyginimas. Tyrimo metu nustatyta, kad neapdoroto šoninio paviršiaus aritmetinė trinties koeficiento vidurkio reikšmė siekia 0,94. Po lazerinio sukepinto šoninio paviršiaus mikroapdorojimo (esant $P = 2,5 \text{ W}$, $V =$

2,5 mm/s), neviršijant 2 ėjimų slenksčio (C5 ir C10 bandiniai), trinties koeficiento reikšmė siekia 0,46 ir 0,54 atitinkamai (3.22 pav.). Skirtumą tarp sukepinto ir lazerio spinduliuote apdoroto paviršiaus lėmė SLS būdu sukepinto paviršiaus topografijos ypatumai bei galimai susiformavę tarpmetaliniai junginiai paviršiniame apdoroto bandinio sluoksnyje. Tuo tarpu labai mažas trinties koeficiento skirtumas tarp paviršių apdorotų, 1 ir 2 ėjimais, pasižymi tiesiogine koreliacija su C serijos lazeriu apdorotų bandinių mikrokietumo pasiskirstymo tendencijomis (3.18 pav.). Didinant lazerinio apdorojimo ėjimų skaičių iki 4 pasiekta mažiausia aritmetinė trinties koeficiento vidurkio reikšmė 0,35 (C11 bandinys). Tai lėmė mažiausias C11 bandinio lazeriu apdoroto paviršiaus šiurkštis (3.13 pav.).



3.22 pav. C eksperimento bandinių tribologinių tyrimų rezultatai
Fig. 3.22. The results of tribological tests of specimens in the experiment C

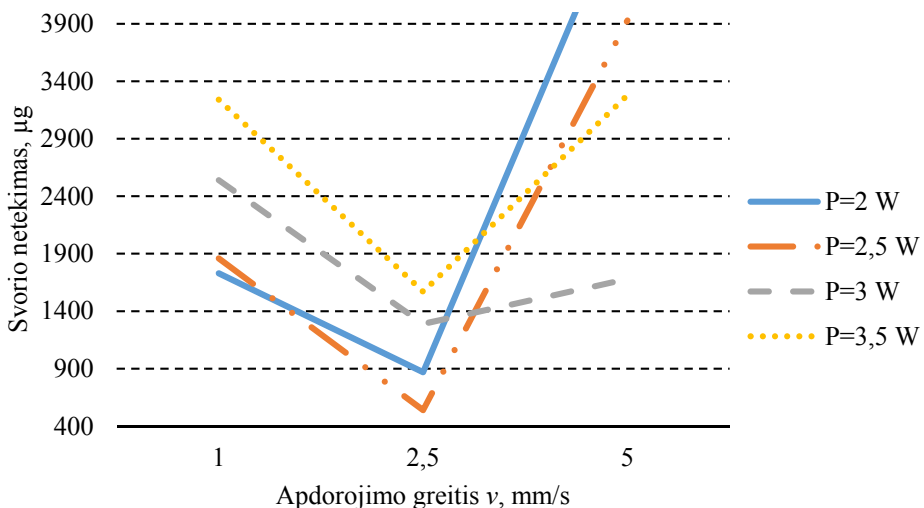
D eksperimento (D1–D14 bandinių) atsparumo dilimui tyrimo rezultatai.

Siekiant įvertinti sukepintų bandinių viršutinių paviršių atsparumą dilimui po lazerinio mikroapdorojimo buvo pasirinkta „ball on plate“ dilimo schema. Dilimo bandymo rezultatai parodė (3.23 pav.), kad esant lazerio apdorojimo galiai nuo 2 iki 3,5 W ir apdorojimo greičiui $V = 1$ mm/s, lazeriu apdoroto paviršiaus svorio netekimas siekia nuo 1730 iki 3240 μg (D1–D4 bandiniai). Lazerinio mikroapdorojimo greičio didinimas iki 2,5 mm/s (E2 įvedamos energijos lygmuo) užtikrino mažiausią lazeriu apdoroto paviršiaus svorio netekimą, kuris siekia nuo 540 iki 1570 μg (D5–D8 bandiniai). Tai lėmė mažesnis bandinių, apdorotų 2,5 mm/s greičiu, paviršiaus mikronelygumų aukštis (3.14 pav.). To-

lesnis lazerinio mikroapdoravimo greičio didinimas iki $v = 5$ mm/s padidino D serijos bandinių svorio netekimą, kuris siekia nuo 1860 iki 3930 μg (D9–D12 bandiniai). Didžiausią svorio netekimą bandinių, apdorotų 5 mm/s greičiu (E1 įvedamos energijos lygmuo), lėmė mažiausias bandinių D3, D6, D9 ir D12 mikrokietumas ir jų didžiausias šiurkštis (3.19 pav.).

Lazeriu apdorotų D serijos bandinių svorio netekimas tiesiogiai koreliuoja su jų paviršiaus profilometrijos tyrimų rezultatais (3.14 pav.).

Apdorojant lazerio spinduliuote sukepintą viršutinį paviršių, mažiausias bandinio svorio netekimas 540 μg (D5 bandinys) stebimas esant E2 įvedamos energijos lygmeniui, kai $P = 2,5$ W; $v = 2,5$ mm/s (3.23 pav.).



3.23 pav. D eksperimento bandinių svorio netekimo priklausomybė nuo lazerinio apdoravimo greičio esant skirtingai apdoravimo galiai

Fig. 3.23. The dependence of specimen mass loss on laser processing speed in the experiment D at different levels of power

Sukepinto ir lazeriu apdoroto viršutinio paviršiaus atsparumas dilimui taip pat buvo įvertintas pagal indentoriaus, naudoto dilimo bandymo metu, išdilimo pėdsako plotį. Skaitinės analizės vertės pateiktos 3.2 lentelėje.

D eksperimento atsparumo dilimui bandymo analizė parodė (3.2 lentelė), kad mažiausias indentoriaus išdilusio takelio plotas stebimas esant E1 lazerinio apdoravimo įvedamos energijos lygmeniui (D3, D6, D9 bandiniai), kai lazerinio apdoravimo greitis $v = 5$ mm/s.

3.2 lentelė. D eksperimento indentorių dilimo vertinimo rezultatai**Table 3.2.** Wear results of the D experiment indentors

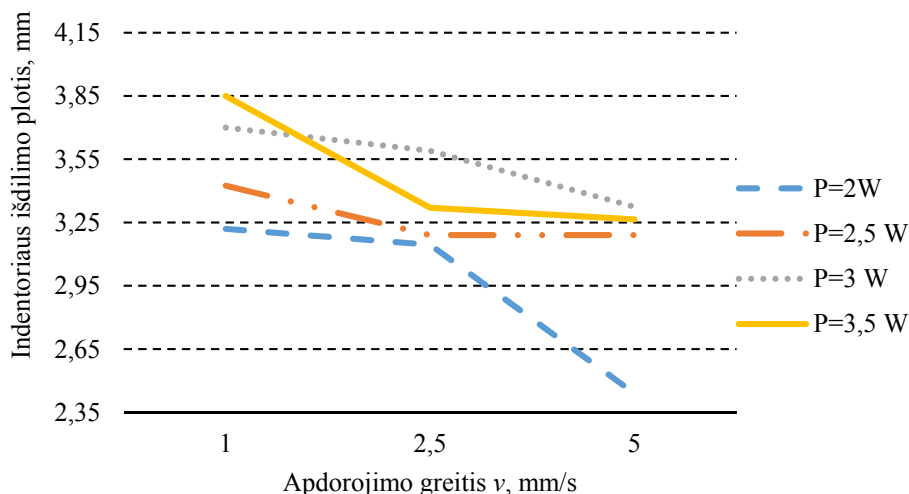
Bandinio žymuo	Indentoriaus išdilimo plotis, mm	Įvedamos energijos lygmuo
D1	3,22	E3
D2	3,15	E2
D3	2,44	E1
D4	3,43	E3
D5	3,19	E2
D6	3,19	E1
D7	3,70	E3
D8	3,59	E2
D9	3,33	E1
D10	3,85	E3
D11	3,32	E2
D12	3,27	E1
Neapdorotas	3,53	-

Indentoriaus išdilusio takelio plotis parodo lazeriu apdoroto bandinio paviršiaus atsparumą dilimui. Kuo mažesnis indentoriaus išdilusio pėdsako dydis, tuo tiriamasis paviršius mažiau atsparus trinčiai. Esant E2 įvedamos energijos lygmeniui (D2, D5, D8 bandiniai), stebimas vidutinis indentoriaus išdilusio takelio plotis, kai lazerinio mikroapdorojimo greitis $v = 2,5$ mm/s. Didžiausias indentoriaus išdilimas (D1, D4, D7 bandiniai) stebimas esant E3 įvedamos energijos lygmeniui, kai $v = 5$ mm/s.

Atliekant indentoriaus atsparumo dilimui tyrimą (3.24 pav.), stebima tiesioginė koreliacija tarp bandinio mikrokietumo ir indentoriaus išdilusio pločio dydžio. Didėjant sukepinto ir apdoroto bandinio mikrokietumui, atitinkamai didėja išdilęs indentoriaus plotis.

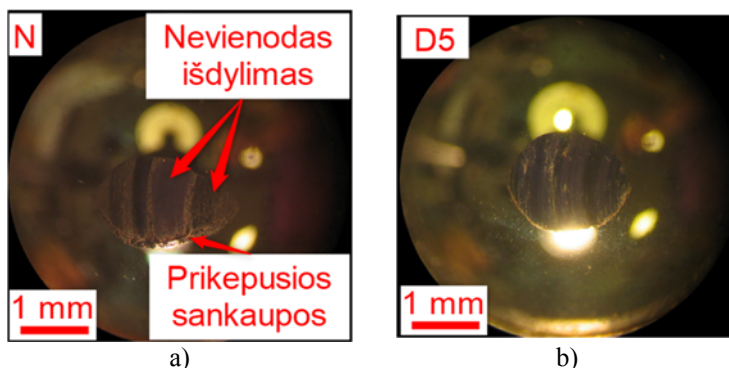
Analizuojant topografinius indentoriaus išdilusio ploto vaizdus (3.25 pav., a), stebimas didelis D eksperimento neapdoroto bandinio atveju indentoriaus ovališkumas bei prikepusios sankaupos ploto pakraščiuose. Sankaupos rodo, kad dilimo procesas neapdoroto bandinio atveju yra intensyvesnis, lyginant su apdoru bandiniu (3.25 pav., b).

Atsparumas dilimui taip pat buvo įvertintas pagal topografinius bandinių išdilusio ploto vaizdus. 3.26 paveiksle matoma, kad neapdoroto bandinio išdilusio takelio plotis yra didesnis nei apdoroto D5 bandinio.



3.24 pav. D eksperimento indentoriaus išdilimo pločio priklausomybė nuo lazerinio apdorojimo greičio esant skirtingai apdorojimo galiai

Fig. 3.24. The dependence of indentors's wear width on laser processing speed in the experiment D at different levels of power

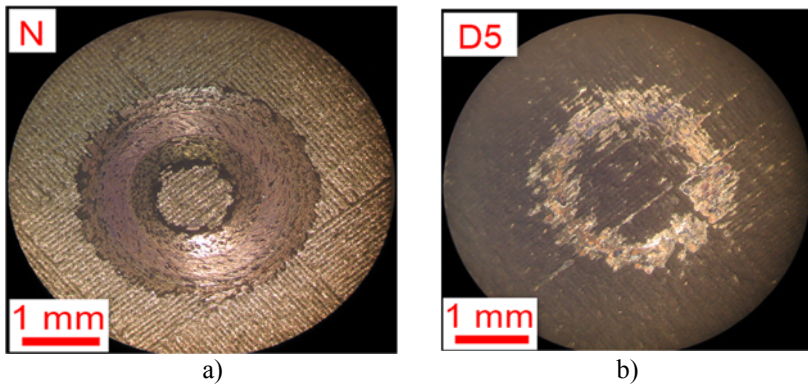


3.25 pav. D eksperimento indentoriaus išdilimo tyrimų rezultatai:

a) neapdorotas; b) D5

Fig. 3.25. Wear results of the D experiment indentors: a) non machined; b) D5

Dilimo bandymo metu nustatyta, kad bandinio dilimo paveikto ploto dydis bei išdilimo intensyvumas D5 bandinio atveju taip pat yra akivaizdžiai mažesni. Skirtumą lėmė 2,9 karto didesnis neapdoroto bandinio paviršiaus šiurkštis bei atitinkamai 1,4 karto mažesnis mikrokietumas.

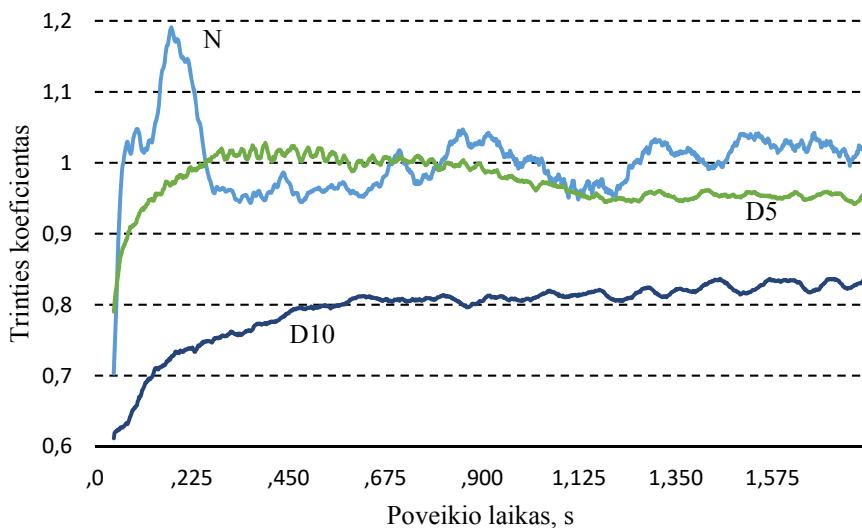


3.26 pav. D eksperimento bandinių išdylimo tyrimų rezultatai:

a) neapdorotas; b) D5

Fig. 3.26. Wear results of the D experiment samples: a) non processed; b) D5

Siekiant nustatyti D eksperimento lazerinio mikroapdorojimo įtaką apdoroto paviršiaus eksploatacinėms charakteristikoms, buvo atliktas trinties koeficiento verčių palyginimas (3.27 pav.).



3.27 pav. D eksperimento bandinių tribologinių tyrimų rezultatai

Fig. 3.27. Wear results of the D experiment samples

Tyrimo metu nustatyta, kad neapdoroto viršutinio paviršiaus aritmetinė trinties koeficiento vidurkio reikšmė siekia 1,05. Tai lėmė ypač didelis neapdoroto viršutinio paviršiaus šiurkštis $R_a = 17,9 \mu\text{m}$. Po lazerinio sukepinto viršutinio paviršiaus mikroapdoravimo vienu ėjimu, esant $P = 2,5 \text{ W}$ ir $V = 2,5 \text{ mm/s}$ (D5 bandinys), trinties koeficiento reikšmė siekia 0,95. Skirtumą tarp sukepinto ir lazerio spinduliuote apdoroto paviršiaus lėmė SLS būdu sukepinto paviršiaus topografijos ypatumai, didesnis mikrokietumas bei mažas lazeriu apdoroto paviršiaus šiurkštis $R_a = 6,22 \mu\text{m}$ (D5 bandinys). Mažiausia aritmetinė trinties koeficiento vidurkio reikšmė 0,81 (D10 bandinys) pasiekta esant 3,5 W galiai ir 1 mm/s apdorojimo greičiui. Tai lėmė didžiausias (D10 bandinys) lazeriu apdoroto paviršiaus mikrokietumas 439 HV (3.19 pav.).

Tyrimo metu nustatyta, kad trinties koeficiento reikšmės koreliuoja su neapdoroto bei D5 ir D10 bandinių paviršinio sluoksnio mikrokietumo reikšmėmis, atitinkamai 279 HV, 401 HV ir 439 HV.

3.5. Cheminė analizė

Selektyviojo lazerinio sukepinimo kokybę lemia žaliavos cheminė sudėtis. Todėl itin svarbu įsitikinti, kad tyrimams panaudoti milteliai atitinka gamintojo pateikiamą specifikaciją (2.1 lentelė). Cheminės sudėties tyrimas remiasi pagrindinių legiruojančiųjų elementų bei deguonies, esančių žaliavos sudėtyje analize. 3.3 lentelėje pateikiama lyginamoji miltelių, neapdoroto bei sukepinto ir lazerio spinduliuote apdoroto paviršiaus cheminė analizė.

3.3 lentelė. Miltelių cheminė sudėtis, masės %

Table 3.3. Chemical composition (in wt. %) of the powder

Žymuo	Cheminė sudėtis					
	Fe	Ni	Co	Mo	Ti	O
Žaliava	Likusi dalis	20	6,9	4,5	0,7	2
Neapdorotas		23	8,2	4,1	0,7	5
D5 bandinys		11,8	6,1	4	0,8	24

Analizės rezultatai parodė, kad cheminė paviršinio sukepinto sluoksnio sudėtis yra labai artima žaliavos cheminei sudėčiai. Nikelio koncentracijos sumažėjimas tarp neapdoroto ir lazerio spinduliuote paveikto paviršiaus nuo 23 iki 11,8 % lėmė žemesnė nei geležies nikelio garavimo temperatūra 3005 K. Dalis nikelio yra tiesiog išgarinama. Selektivusis lazerinis sukepinimas vyksta apsauginių argono dujų aplinkoje, o lazerinis sukepinto paviršiaus mikroapdorojimas vyksta be apsauginės aplinkos. Deguonies koncentracijos paviršinio sluoksnio

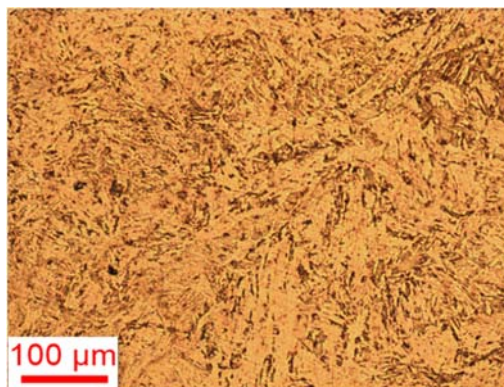
metale padidėjimo šuolį tarp neapdoroto ir lazerio spinduliuote paveikto paviršiaus nuo 5 iki 24 % lemia aukšta apdorojimo zonos temperatūra ir difuziniai virsmai tarp bandinio paviršiaus ir supančios aplinkos. Deguonies prisotintame paviršiuje padidėja intermetalinių junginių formavimosi tikimybė.

3.6. Mikrostruktūros analizė

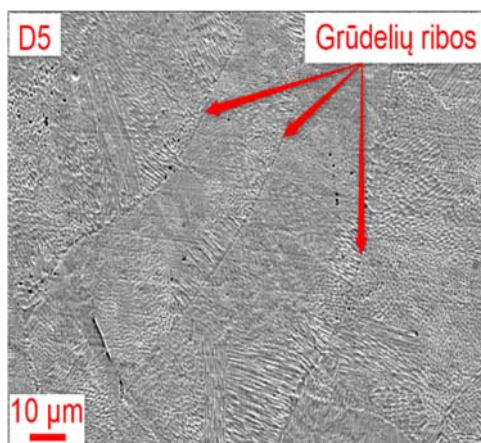
Tiriamiesiems bandiniams gaminti naudoti Fe-Ni-Co pagrindo milteliai, kurie dažnai taikomi polimerų liejimo įrangos pramonėje. Šio plieno detalėms gaminti pasaulyje taikomos dvi technologijos: tradicinė ir adityvinė gamyba. Tradicinės gamybos atveju naudojami apvalaus skerspjūvio ruošiniai ir valcuoti strypai. Tradicinei gamybai naudojama žaliava pasižymi išskirtine-martensitine struktūra. Čia liekamojo austenito ir intermetalinių junginių kiekis yra labai mažas (Jagle *et al.* 2010). Šis efektas pasiekiamas dėl aukštatemperatūrio sendinimo 480–510 °C. Homogeniška struktūra užtikrina minimalius liekamuosius įtempius, pastovias visame detalės tūryje mechanines ir fizikines charakteristikas, leidžia prognozuoti detalių ir mazgų ilgaamžiškumą bei kitas eksploatacines charakteristikas.

Selektyviojo lazerinio sukepimo atveju situacija yra labiau komplikauta. Aukštų kokybės reikalavimų, keliamų žaliavai, nepakanka galutinio gaminio kokybei užtikrinti. Čia dėl specifinio šilumos įvedimo, būdingo lazeriniam apdirbimui, sukepintų gaminių mikrostruktūra nėra tobula (3.28 pav.). Tradicinėje metalų gamybos ir apdirbimo pramonėje martensitinė gaminio struktūra yra užtikrinama naudojant terminį apdirbimą – grūdinimą. AM atveju martensitinė gaminio struktūra užtikrinama aukšta nikelio koncentracija (Jagle *et al.* 2010). Pagrindinis martensitinės struktūros bruožas – pailgi, adatos formos grūdėliai. Nevienalytis ir nekryptingas grūdėlių išsidėstymas matomas sukepinto bandinio paviršinio sluoksnio mikrostruktūroje (3.28 pav.). Tamsaus atspalvio plotai – tai liekamojo austenito bei priemaišų pėdsakai. Dėl apsauginių dujų, kenksmingų priemaišų kiekis po selektyviojo lazerinio sukepimo yra minimalus.

Sukepinto ir papildomai lazerio spinduliuote mikroapdoroto bandinio paviršinio sluoksnio mikrostruktūra yra labai artima neapdoroto bandinio mikrostruktūrai. Akivaizdaus mikrostruktūros dedamųjų skirtumo nebuvimas lazerio spinduliuote mikroapdoroto bandinio paviršiuje leidžia teigti, kad sukietinto sluoksnio storio nustatymas remiantis metalo struktūros dedamųjų pokyčiais yra neįmanomas. Struktūros vienodumas taip pat byloja apie minimalius liekamuosius įtempius sukepinto ir papildomai lazerio spinduliuote apdoroto bandinio paviršiuje.



3.28 pav. Neapdoroto bandinio mikrostruktūra
Fig. 3.28. Microstructure of non processed sample



3.29 pav. Lazeriu apdoroto D5 bandinio mikrostruktūra
Fig. 3.29. Microstructure image of the laser processed sample

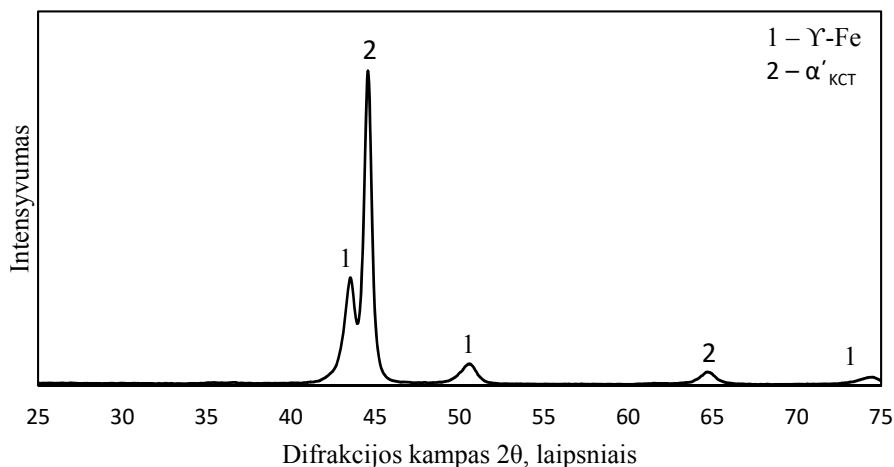
Tyrimo metu nustatyta (3.29 pav.) kad, lazeriu apdoroto paviršiaus mikrostruktūrą sudaro adatos formos grūdėliai. Grūdėlių paribių plotai pasižymi savita raižyta faktūra, kuri galimai susidarė dėl liekamojo austenito, esančio grūdėlių ribose. Literatūroje nurodoma, kad SLS būdu sukepinto Fe-Ni-Co miltelinio pagrindo metalo mikrostruktūroje yra liekamasis austenitas, kuris išsidėsto grūdėlių ribuose. (Jagle *et al.* 2010; Yasa *et al.* 2010; Kempen *et al.* 2010) nustatė, kad liekamojo austenito kiekis Fe-Ni-Co plienų, pagamintų AM technologija, yra apie 17 %. Jie taip pat pastebėjo, kad intermetalinių junginių kiekis gaminio tūryje lemia jo kietumą.

3.7. Fazinė analizė

Siekiant įvertinti paviršiaus fazinės sudėties pokyčius, sukeltus mikrolazerinio apdorojimo, bei pokyčių priklausomybę nuo mikroapdorojimo parametrų, buvo atlikta sukepintų bei lazeriu apdorotų bandinių rentgeno difrakcinė analizė nustatant jų fazinę ir procentinę sudėtį.

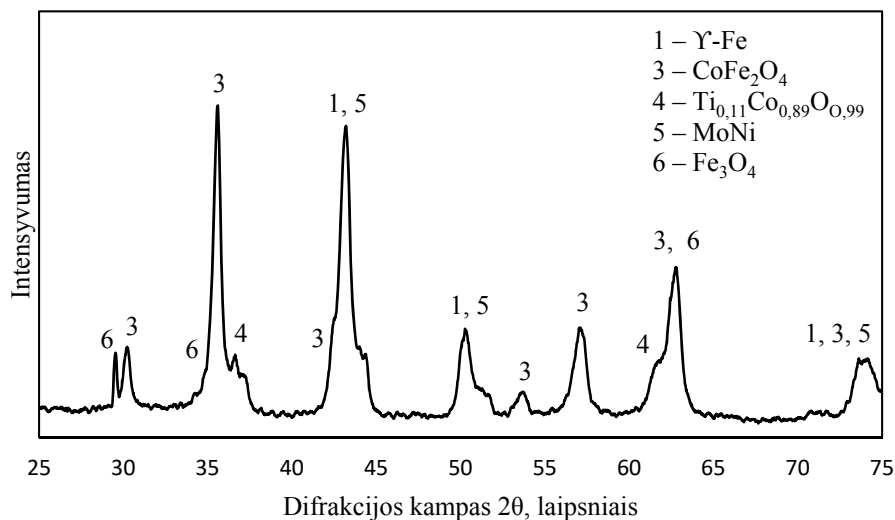
Ne tik rentgenogramose vaizduojamų intermetalinių junginių tankis, kiekis, bet ir oksidinių junginių koncentracija gali lemti lazeriu apdorotų paviršių mechanines ir eksploatacines charakteristikas.

SLS sukepinto ir neapdoroto bandinio paviršiaus difrakcinė kreivė pateikta 3.30 paveiksle. Intensyviausia kreivės smailė ir smailė, kuri susiformavo kreivėje esant 2θ kampui apie $64,5^\circ$, atitinka kubinę centratūrę kristalinę gardelę su parametru $a = 2,866 \text{ \AA}$. Tokio tipo gardelė yra būdinga „kubiniam“ martensitui, kuris susiformuoja grūdinant mažai anglies turinčius plienus. Kitos smailės atitinka austenito kubinę centrapaviršę gardelę su parametru $a = 3,63 \text{ \AA}$. Remiantis šia analize nustatyta, kad tiriamojo bandinio paviršinio sluoksnio metalo struktūrą sudaro martensitinė struktūra su KCT gardele ir liekamasis austenitas.



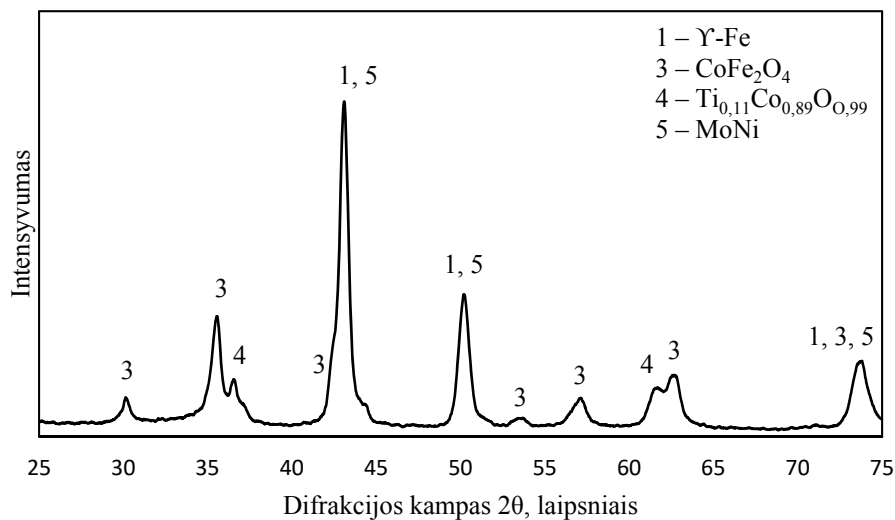
3.30 pav. Lazeriu neapdoroto bandinio rentgeno difrakcinė kreivė
Fig. 3.30. Rentgen diffraction analyse of the non processed sample

Remiantis 3.30–3.33 paveiksluose pateiktų difrakcinių kreivių analize nustatyta, kad dėl lazerinės spinduliuotės poveikio tiriamųjų bandinių paviršiuose susidarė liekamasis austenitas ir molibdeno nikelio tarpmetalinio junginio fazė bei kobalto geležies CoFe_2O_4 , titano kobalto $\text{Ti}_{0,11}\text{Co}_{0,89}\text{O}_{0,99}$ ir geležies Fe_3O_4 oksidai.



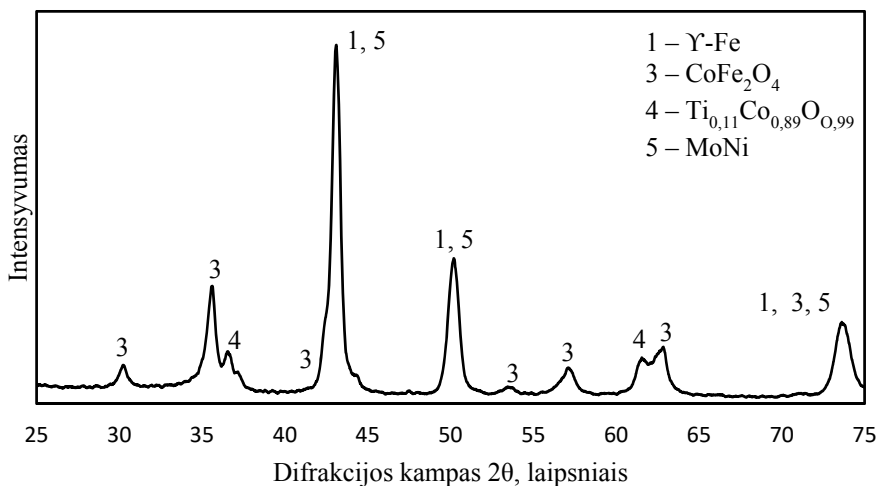
3.31 pav. Lazериu apdoroto bandinio D4 rentgeno difrakcinė kreivė

Fig. 3.31. XRD pattern of the D4 sample



3.32 pav. Lazериu apdoroto bandinio D5 rentgeno difrakcinė kreivė

Fig. 3.32. XRD pattern of the D5 sample



3.33 pav. Lazериu apdoroto bandinio D6 rentgeno difrakcinė kreivė

Fig. 3.33. XRD pattern of the D6 sample

Tikėtina, kad susiformavę kietieji oksidai lėmė didesnę lazeriu apdorotų bandinių kietį.

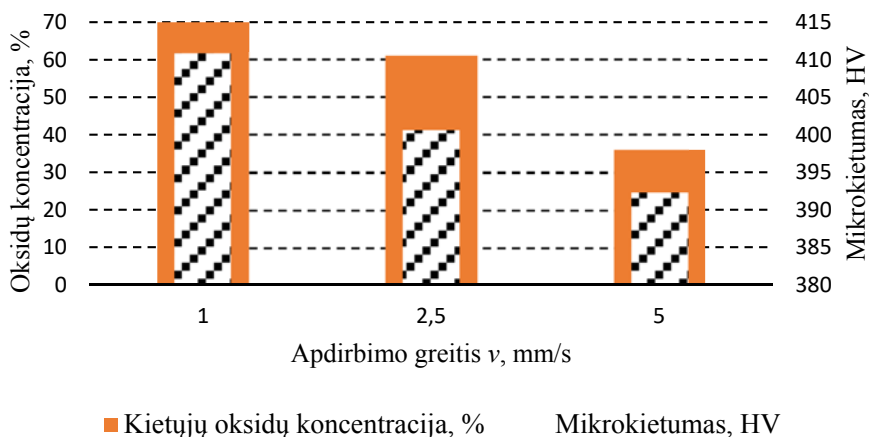
Taikant Ritveldo metodą, buvo atliktas RSDA eksperimentinių rezultatų apdorojimas, kuris leido apskaičiuoti bandiniuose aptiktų fazių procentinį santykį. RSDA nustatyta, kad apdorotų bandinių paviršiuose susiformuoja liekamasis austenitas ir molibdeno nikelio tarpmetalinis junginys bei geležies kobalto, titano kobalto ir geležies oksidai. Kietumo padidėjimui didžiausią poveikį turi didelio kietumo fazės, tokios kaip: titano kobalto bei geležies kobalto oksidai. 3.4 lentelėje pateikiama bendra kietųjų oksidų koncentracija (%) bandinių paviršiuose, apdorotuose esant 2,5 W lazerio spindulio pluošto galiai ir taikant skirtingą apdorojimo greitį.

Mikrolazerinio apdorojimo greičio didinimas nuo 1 mm/s iki 5 mm/s esant 2,5 W galiai, lemia kietųjų metalo oksidų koncentracijos sumažėjimą nuo 70 % iki 36 % (3.4 lentelė). Analogiškas mikrolazerinio apdorojimo greičio pokytis esant 3 W galiai, lemia kietųjų metalo oksidų koncentracijos sumažėjimą nuo 68 % iki 37 %. Lazerinio mikroapdorojimo greičio didinimas lemia kietųjų metalo oksidų koncentracijos sumažėjimą. Tai susiję su mažesne lazeriu mikroapdoroto paviršiaus temperatūra, trumpesniu poveikio laiku bei paviršiaus metalo oksidaciniais procesais. Ši nustatyta priklausomybė koreliuoja su SLS būdu sukepintų ir lazeriu mikroapdorotų paviršių mikrokietumo pokyčiais didinant apdorojimo greitį (žr. 3.17 ir 3.19 pav.).

3.4 lentelė. Sukepinto ir lazeriu apdoroto metalo paviršinio sluoksnio oksidų koncentracija, %

Table 3.4. Concentration of oxides in the sintered and laser processed surface metal layer, %

Bandinio žymuo	Įvedamos energijos lygmuo	Apdorojimo greitis, mm/s	Kietųjų oksidų koncentracija, %
D4	E3	1	70
D5	E2	2,5	61
D6	E1	5	36



3.34 pav. Selektyviuoju lazerinio sukepinimo būdu pagamintų ir lazeriu mikroapdorotų bandinių kietumo priklausomybė nuo kietųjų oksidų koncentracijos esant skirtingam apdirbimo greičiui

Fig. 3.34. The dependence of hardness of selective laser sintering-made specimens after their laser microprocessing on the concentration of solid oxides at different processing speeds

Sukepintų ir lazeriu mikroapdorotų bandinių paviršinio metalo sluoksnio kietumo ir kietųjų oksidų koncentracijos verčių palyginimas pateiktas 3.34 paveiksle.

Tyrimo metu nustatyta, kad lazeriu 2,5 W galia apdorojant sukepintą paviršius esant 1 mm/s apdorojimo greičiui (E1 lazerinio apdorojimo įvedamos energijos lygmuo) lazeriu mikroapdoroto viršutinio paviršiaus mikrokietaumas siekia 411 HV, kai kietųjų oksidų koncentracija yra apie 70 %. Esant apdirbimo greičio didinimui nuo 1 mm/s iki 2,5 mm/s, lazeriu apdoroto paviršiaus mikrokietaumas sumažėja iki 401 HV, o kietųjų oksidų koncentracija sumažėja iki 61 %.

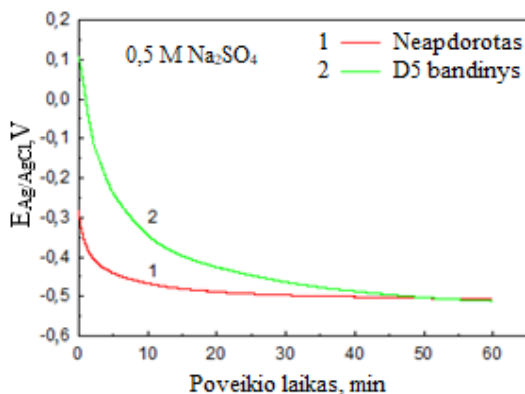
Didžiausiu greičiu apdorojant SLS būdu sukepintą paviršių, kai $V = 5$ mm/s, lazeriu apdoroto paviršiaus mikrokietumas siekia 392 HV, o kietųjų oksidų koncentracija atitinkamai sumažėja iki 36 %.

SLS būdu sukepto ir lazeriu mikroapdoroto paviršiaus mikrokietumo vertių sumažėjimą lėmė metalo paviršinio sluoksnio kietųjų oksidų koncentracijos pokytis nuo 70 % iki 36 % esant lazerinio mikroapdorojimo greičio didinimui nuo 1 mm/s iki 5 mm/s atitinkamai pereinant nuo 3 iki 1 lazerinio apdorojimo įvedamos energijos lygmens.

Remiantis lazeriu mikroapdorotų bandinių fazine analize galima teigti, kad metalų oksidų koncentracija ir tarpmetalinių junginių formavimas paviršiniame lazeriu mikroapdorotame sluoksnyje lemia jo mikrokietį.

3.8. Atsparumas elektrocheminei korozijai

Tyrimams naudojama Fe-Ni-Co miltelių pagrindu sukepinta medžiaga dažnai taikoma plastiko liejimo formų gamyboje. Čia dėl didelio išsiskiriančių dujų poveikio itin pageidaujamas darbinų įrangos detalių atsparumas korozijai. Plastiko liejimo formos eksploatavimas darbiniais paviršiais esant neatspariems korozijai yra neleistinas.

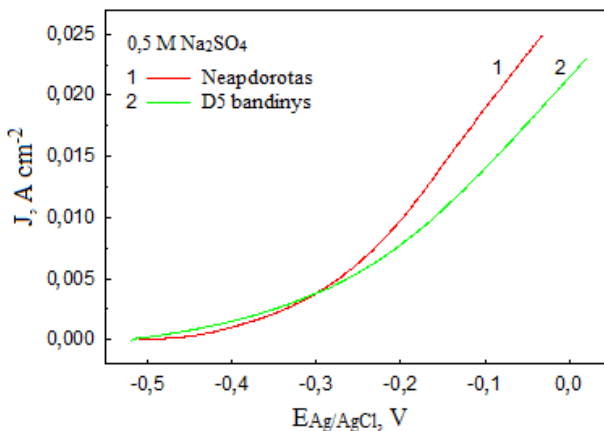


3.35 pav. Sukeptintų bandinių atviros grandinės potencialų (E_{ocp}) priklausomybės nuo ekspozicijos laiko 0,5 M Na_2SO_4 tirpale

Fig. 3.35. Open circuit potentials (E_{ocp}) relation from exposure time of the sintered samples (in 0,5 M Na_2SO_4 solution)

Sukeptintų bandinių atviros grandinės potencialų priklausomybė nuo ekspozicijos laiko yra vaizduojama 3.35 paveiksle. Ne tik potencialo matematinė vertė, bet ir pokyčio sparta rodo analizuojamos medžiagos atsparumą korozijai.

Esant 10 min. poveikiui, potencialo pokytis neigiamų srovių diapazone neapdoroto bandinio atveju sudarė 0,57 V, o D5 bandinio 0,45 V. Kuo didesnis potencialo pokytis, tuo korozijos proceso intensyvumas yra didesnis. Potencialo verčių bei pokyčio spartos skirtumas matomas iki 50 poveikio laiko minutės. Nuo 50 iki 60 min. korozinio atsparumo rodikliai abiejų bandinių atveju yra vienodi.



3.36 pav. Sukepintų bandinių potenciodinaminės poliarizacijos kreivės 0,5M Na₂SO₄ tirpale

Fig. 3.36. Potentiodynamic polarization curves of the sintered samples (in 0,5M Na₂SO₄ solution)

Sukepintų bandinių anodinės poliarizacijos kreivės yra vaizduojamos 3.36 paveiksle. Anodinės poliarizacijos kreivių skirtumas tarp neapdoroto ir apdoroto bandinio D5, potencialo vertėms esant nuo -0,5 V iki -0,3 V, nėra stebimas. Tai reiškia, kad šioje diagramoje vaizduojamų reikšmių atkarpoje korozinis abiejų bandinių atsparumas yra analogiškas. O potencialų intervale nuo -0,3 V iki -0,05 V pastebimas nedidelis korozinės srovės tankio skirtumas. Esant -0,1 V potencialui neapdoroto bandinio korozinės srovės tankis siekia 0,17 A/cm², o lazeriu apdoroto bandinio D5 0,11 A/cm². Korozinės srovės tankio vertės yra proporcingos tiramos medžiagos gebai priešintis korozijai. Kuo didesnės korozinės srovės tankis, tuo medžiaga labiau pažeidžiama korozijos. E_{Ag/AgCl}, V.

3.9. Trečiojo skyriaus išvados

1. Mikroskopijos tyrimo metu nustatyta, kad Fe-Ni-Co miltelių pagrindu sukeptam ir papildomai neapdorotam paviršiui būdingas skirtingos krypties didelis paviršiaus netolygumas, formuojasi ryškūs iš-

gaubti aplydymo sluoksniai, šoninio paviršiaus šiurkštis siekia $R_a = 9,2 \mu\text{m}$, o viršutinio $R_a = 17,9 \mu\text{m}$.

2. SLS būdu sukepintų, papildomai šlifuotų ir lazeriu mikroapdorotų bandinių paviršiaus morfologijos ir topografijos tyrimais nustatyta, kad esant 2,5 W apdorojimo galiai, 2,5 mm/s apdorojimo greičiui buvo pasiekta geriausia topografija. Tyrimo metu nustatyta, kad lazerinio mikroapdorojimo ėjimų skaičiaus didinimas lemia įtrūkių atsiradimą paviršiniame metalo sluoksnyje.
3. SLS būdu sukepintų ir lazeriu mikroapdorotų šoninių bandinių paviršių morfologijos ir topografijos tyrimais nustatyta, kad lazeriu mikroapdorojant šoninį sukeptą paviršių formuojasi trys esminės apdoroto paviršiaus faktūros: korėta ir nepakankamai išsilydžiusi, netvarkingai išgarinta su chaotiškai išsidėščiusiais iškilimais ir tolygiai bei kryptingai išgarinta. Tyrimų metu nustatyta, kad esant E2 įvedamos energijos lygmeniui užtikrinamas mažiausias paviršiaus mikronelygumų aukštis $R_a = 4,27 \mu\text{m}$ (esant 2,5 W galiai ir 4 ėjimų skaičiui). Ėjimų skaičiaus didinimas nuo 1 iki 4 lemia sukeptinto ir lazeriu apdoroto paviršiaus šiurkštumo reikšmės sumažėjimą apie 21 % ir jo eksploatacinių savybių pagerėjimą. Dar daugiau didinant mikrolazerinio apdorojimo ėjimų skaičių, apdoroto bandinio paviršiuje formuojasi įtrūkiai.
4. SLS būdu sukepintų ir lazeriu mikroapdorotų viršutinių bandinių paviršių morfologijos ir topografijos tyrimais nustatyta, kad esant E2 įvedamos energijos lygmeniui formuojasi geriausia paviršiaus faktūra, pasižyminti mažiausiu paviršiaus mikronelygumų aukščiu $R_a = 6,22 \mu\text{m}$ (esant 2,5 W galiai ir 1 ėjimų skaičiui). Tyrimų metu nustatyta, kad lazeriu mikroapdorojant viršutinį sukeptą paviršių daugiau nei 1 ėjimu, skatinamas paviršiaus mikronelygumų aukščio rodiklių padidėjimas iki $R_a = 18,41 \mu\text{m}$, kai $n = 4$, nes bandinio paviršiuje pasireiškia medžiagos pleišėjimas ir susiformuoja įtrūkiai.
5. Tyrimo metu nustatyta, kad didinant lazerio galią bei įvedamos energijos kiekį (esant perėjimui nuo pirmo iki trečio įvedamos energijos lygmens) viršutinio ir šoninio paviršiaus mikrokietumas didėja nuo 372 iki 439 HV ir nuo 509 iki 558 HV atitinkamai.
6. Mikrokietumo tyrimo metu nustatyta, kad lazeriu mikroapdorojant sukeptą bandinį viršutinio ir šoninio paviršiaus metalo mikrokietumas padidėja iki 48 % ir iki 88 % atitinkamai. Lazerinio mikroapdorojimo ėjimų skaičiaus didinimas neturi įtakos metalo paviršinio sluoksnio mikrokietumui.

7. Tribologinių savybių ir atsparumo dilimui tyrimo metu nustatyta, kad lazeriu mikroapdorojant sukepintą bandinį viršutinio ir šoninio paviršiaus metalo trinties koeficientas sumažėja 19 % ir 63 %, o lazeriu mikroapdoroto metalo paviršinio sluoksnio dilimo greitis – 17 ir 39 kartų atitinkamai.
8. Mikrostruktūros tyrimo metu nustatyta, kad sukepintam bandinio metalui būdinga nevienalytė, nekryptingai išsidėsčiusių adatinių grūdelių struktūros morfologija, o mikrostruktūrą sudaro martensitas, liekamasis austenitas ir priemaišos. Tyrimo metu nustatyta, kad sukepinto ir lazeriu mikroapdoroto paviršiaus mikrostruktūrą sudaro adatos formos grūdeliai. Grūdelių paribių plotai pasižymi savita raižyta faktūra, kuri galimai susidarė dėl liekamojo austenito, esančio grūdelių ribose.
9. Fazinės analizės metu nustatyta, kad sukepinto bandinio metalą sudaro kubinę centratūrę kristalinę gardelę turintis martensitas ir liekamasis austenitas. Sukepinto ir lazeriu mikroapdoroto metalo paviršiniame sluoksnyje be pagrindinių metalo matricą sudarančių fazių formuojasi įvairūs geležies, kobalto ir kitų metalų oksidai. Suminė oksidų koncentracija metalo paviršiuje didėja mažinant lazerinio mikroapdorojimo greitį, t. y. didinant įvedamos energijos kiekį.
10. Tyrimo metu nustatyta, kad besiformuojantys metalo oksidai ir jų koncentracija lemia sukepinto ir lazeriu mikroapdoroto paviršiaus mikrokietumą.
11. Korozinio atsparumo tyrimo metu nustatyta, kad lazerinis sukepinto Fe-Ni-Co miltelinio pagrindo paviršiaus mikroapdorojimas neturi neigiamos įtakos lazeriu mikroapdoroto paviršiaus koroziniam atsparumui.

Bendrosios išvados

1. Fe-Ni-Co miltelių pagrindu sukepintų SLS būdu gaminių papildomo lazerinio mikroapdorojimo technologija leidžia modifikuoti sukepintą metalą. Nustatytas SLS būdu sukepinto miltelinio Fe-Ni-Co pagrindo metalo paviršinio sluoksnio lazerinio mikroapdorojimo poveikis (lazerio spindulio pluošto galios, apdirbimo greičio ir ėjimų kiekio) sluoksnio formavimosi procesui bei jo fizikinėms savybėms (mikrokietumui, dilimo greičiui, paviršiaus mikronelygumų aukščiui, atsparumui korozijai ir kt.).
2. SLS būdu sukepinto ir lazeriu mikroapdoroto Fe-Ni-Co miltelinio pagrindo topografija priklauso nuo lazerinio apdorojimo įvedamos energijos lygmens. Esant apdorojimo greičiui $V = 2,5$ mm/s; apdirbimo galiai $P = 2,5$ W, lazerinio mikroapdorojimo režimui šoninio ir viršutinio paviršių (vertikalus ir horizontalus paviršiai) šiurkščio parametras R_a sumažėja 54 % ir 65 % bei sudaro $R_a = 4,27$ μm ir $R_a = 6,22$ μm atitinkamai.
3. SLS būdu sukepinto ir lazeriu mikroapdoroto Fe-Ni-Co miltelinio pagrindo paviršiaus kietumas priklauso nuo lazerinio apdorojimo metu paviršiniame metalo sluoksnyje susidarančių kietųjų oksidų CoFe_2O_4 ir $\text{Ti}_{0,11}\text{Co}_{0,89}\text{O}_{0,99}$ koncentracijos. Didėjant kietųjų oksidų koncentracijai, paviršinio metalo sluoksnio mikrokietumas didėja. Esant apie 70 % kietųjų oksidų koncentracijai ($P = 2,5$ W; $V = 2,5$ mm/s), sukepinto ir lazeriu mikroapdoroto šoninio ir viršutinio paviršių mikrokietumas padi-

dėja 88 % ir 48 % lyginant su lazeriu neapdorotais paviršiais ir sudarė 558 HV ir 439 HV atitinkamai.

4. SLS būdu sukepinto ir lazeriu mikroapdoroto Fe-Ni-Co miltelinio pagrindo paviršiaus dilimo greitį lemia kompleksinis lazeriu apdoroto metalo paviršinio sluoksnio mikrokietumo bei morfologijos pokytis. Padidėjęs šoninio (nuo 71 % iki 88 %) ir viršutinio nuo (25 % iki 48 %) paviršių mikrokietumas bei šoninio paviršiaus vidutinio mikronelygumų aukščio sumažėjimas 54 % o viršutinio 65 % (esant $P = 2,5$ W; $V = 2,5$ mm/s) lyginant su neapdorotu bandiniu lemia sukepinto ir lazeriu mikroapdoroto šoninio ir viršutinio paviršių dilimo greičių mažėjimą 39 ir 17 kartų atitinkamai.

Literatūra ir šaltiniai

- Abouridouane, M., Klocke, F., Dobbeler, B. 2017. Characterisation and modelling of the machinability of ferritic-pearlitic steels in drilling operations, *Procedia CIRP* 25: 79–84.
- Amend, P., Pscherer, C., Rechtenwald, T., Frick, T., Shmidt, M. 2010. A fast flexible method for manufacturing 3D molded interconnect devices by the use of a rapid prototyping technology, *Physics procedia* 5: 561–572.
- Aniolek, K., Kupka, M., Barylski, A. 2016. Sliding wear resistance of oxide layers formed on a titanium surface during thermal oxidation, *Wear* 23: 356–357.
- Aniolek, K., Kupka, M., Barylski, A., Dercz, G. 2016. Mechanical and tribological properties of oxide layers obtained on titanium in the thermal oxidation process, *Applied Surface Science* 357 (B): 1419–1426.
- Balachninaité, O., Bargelis, A., Dementjev, A., Jonušas, R., Račiukaitis, G., Sirutkaitis, V. 2008. *Lazerinė technologija*. Vilniaus universiteto leidykla.
- Bauereiss, A., Scharowsky, T., Korner, C. 2014. Defect generation and propagation mechanism during additive manufacturing by selective beam melting, *Journal of materials processing technology* 214 (11): 2522–2528.
- Bhaduri, D., Penchev, P., Dimov, S., Soo, S. 2016. An investigation of accuracy, repeatability of laser micromachining systems, *Measurements* 88: 248–261.
- Binder, M., Klocke, F., Doebbler, B. 2017. An advanced numerical approach on tool wear simulation for tool and process design in metal cutting, *Simulation modelling practise and theory* 22: 65–82.

Biswas, A., Majumdar, J. 2009. Surface characterization and mechanical property evaluation of thermally oxidized Ti-6Al-4V, *Materials Characterization* 60 (6): 513–518.

Black, S., Jobling, L. 2014. Physical principles of laser, *Anaesthesia and intensive care medicine* 15: 530–532.

Bouquet, J., Van Camp, D., Malek, O., Haaf Ten, P., Vanmeensel, K., Lauwers, B. 2016. Aiming for improved lifetime of die and mold components through an integrated laser hardening operation, combining machining and selective heat treatment in one step, *Procedia CIRP* 46: 541–544.

Brandt, M. 2017. The role of lasers in additive manufacturing environment, *Laser additive manufacturing* 5 (A): 65–80.

Cadot, G., Axinte, D., Billingham, J. 2016. Continuous trench, pulsed laser ablation for micro machining applications, *International journal of machine tools and manufacture* 107: 8–20.

Castanhera, I., Diniz, A. 2016. High speed machining of hardened steel convex surface, *Procedia manufacturing* 5: 220–231.

Chavoshi, S., Goel, S., Morantz, P. 2017. Current trends and future of sequential micro machining processes on a single machine tool, *Materials and design* 127: 37–53.

Cheng, J., Liu, Ch., Shang, S., Liu, D., Perrie, W., Dearden, G., Watkins, K. 2013. A review of ultrafast laser materials micromachining, *Optics & laser technology* 46: 88–102.

Choudhury, S., Chinchani, S. 2017. Finish machining of hardened steel, *Comprehensive materials finishing* 1: 47–92.

Chroma. [interaktyvus] 2017. [Žiūrėta 2017 m. gegužės 2 d.] Prieiga per internetą: www.chroma.com

Cui, W., Jiao, F. P., Ming, O. 2017. Reliability analysis of ceramic cutting tools in continuous and interrupted hard turning, *Ceramics international* 43 (13): 10109–10122.

Dahotre, N., Samant, A. 2011. Laser Machining of advanced materials. New York: CRC Press. 236 p.

Demir, A., Pangovski, K., O'Neill, W., Previtali, B. 2014. Laser micromachining of TiN coatings with variable pulse durations and shapes in ns regime, *Surface and coatings technology* 258: 240–248.

Ding, Z., Li, B., Fergani, O., Shao, Y., Liang, S. 2016. Investigation of temperature and energy partition during maraging steel micro grinding, *Procedia CIRP* 56: 284–288.

Dohr, J., Armstrong, D., Tarleton, E., Couvant, T., Perez, S. 2017. The influence of surface oxides on the mechanical response of oxidized grain boundaries. *Thin Solid Films* 632: 17–22.

Engineering inform, inspire. [interaktyvus] 2017. [Žiūrėta 2017 m. gegužės 8 d.] Prieiga per internetą: www.engineering.com

Farahmand, P., Kovacevic, R. 2014. An experimental – numerical investigation of heat distribution and stress field in single – and multi – track laser cladding by high – power direct diode laser, *Optics & Laser Technology* 63: 154–158.

Fimark Ltd. [interaktyvus] 2017. [Žiūrėta 2017 m. gegužės 5 d.] Prieiga per internetą: www.fimark.co.uk

Fousova, M., Vojtech, D., Kubasek, J., Jablonska, E., Fojt, J. 2017. Promising characteristics of gradient porosity Ti – 6Al – 4V alloy prepared by SLM process, *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 69: 368–376.

Francis, L. 2016. Chapter 5 – powder processes. Materials processing. 343–414.

Fusione. [interaktyvus] 2017. [Žiūrėta 2017 m. gegužės 3 d.] Prieiga per internetą: www.fusione.enea.it

Gaub, H. 2016. Customization of mass – produced parts by combining injection molding and additive manufacturing with industry 4.0 technologies, *Reinforced plastics* 60 (6): 401–404.

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. 2015. Additive manufacturing technologies. New York: Springer. 498 p.

Gillner, A., Holtkamp, J., Hartmann, C., Olowinsky, A., Gedicke, J., Klages, K., Bosse, L., Bayer, A. 2005. Laser applications in microtechnology, *Journal of materials processing technology* 163 (2): 494–498.

Gross, S., Eckert, U., Edelmann, J. 2016. New sequential manufacturing process for micro and finishing machining, *Procedia CIRP* 46: 559–562.

Gu, D., Shen, Y. 2009. Effects of processing parameters on consolidation and microstructure of W – Cu components by DLMS, *Journal of alloys and compounds* 10 (4): 107–115.

Gurr, M., Mulhaupt, R. 2012. Rapid prototyping, Comprehensive referece 8: 77–99.

Gusarov, A., Laoui, T., Froyen, L., Titov, V. 2003. Contact thermal conductivity of a powder bed in selective laser sintering, *International journal of heat and mass transfer* 46 (3): 1103–1109.

Haudet, S., Rodriguez, M., Carranza, R. 2015. Determining the effect of the main alloying elements on localized corrosion in Nickel alloys using artificial neural networks, *Procedia materials science* 8: 21–28.

Hong, S., Lee, H., Ko, S. 2016. Digital selective laser methods for nanomaterials: From synthesis to processing, *Nanotoday* 11 (5): 547–564.

Hu, J., Dang, D., Shen, H., Zhang, Z. 2011. A finite element model using multi – layered shell element in laser forming, *Optics and laser technology* 44 (4): 1148–1155.

Huang, Y., Yang, L., Du, Y. Y. 2016. Finite element analysis of thermal behavior of metal powder during selective laser melting, *International journal of thermal science* 104: 146–157.

Yadollahi, A., Shamsaei, N., Thompson, S., Elwany, A., Bian, L. 2017. Effects of building orientation and heat treatment on fatigue behavior of selective laser melted 17 – 4 PH stainless steel, *International journal of fatigue* 94 (2): 218–235.

Yang, X., Tang, J. 2014. Research on manufacturing method of CNC plunge milling for spur face-gear, *Journal of materials processing technology* 214 (2): 3013–3019.

Yasa, E., Kempen, K., Kruth, K. 2011. Microstructure and mechanical properties of maraging steel after selective laser melting, *Physics procedia* 12 (A), 383–396.

Yilbas, B., Arif, A. 2010. Laser cutting of steel and thermal stress development, *Optics and laser technology* 43 (4): 830–837.

Innovative manufacturing technology. [interaktyvus] 2017. [Žiūrėta 2017 m. gegužės 6 d.] Prieiga per internetą: www.imt-c.co.kr

Yu, J., Lin, X., Ma, L., Wang, J., Fu, W., Chen, J., Huang, W. 2010. Influence of laser deposition patterns on part distortion, interior quality and mechanical properties by laser solid forming, *Materials science and engineering* 528 (3): 1094–1104.

Ivanova, T. 2016. Design and technology support of the grinding process for heavily-machined steel sheets, *Procedia engineering* 150: 782–788.

Jiang, W., Nair, R., Molian, P. 2005. Functionally graded mold inserts by laser – based flexible fabrication: processing modeling, structural analysis, and performance evaluation, *Journal of materials processing and technology* 166 (2): 286–293.

Kempen, K., Yasa, E., Thijs, L., Kruth, J., Humbeeck, J. 2011. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted 18Ni-300 steel, *Physics procedia* 12 (A): 255–263.

Kumar, A., Yadava, V. 2007. International journal of machine tools and manufacture. *Laser beam machining* 45 (6): 609–628.

Kumar, S. 2009. Manufacturing of WC – Co moulds using SLS machine, *Journal of materials processing technology* 209 (8): 3840–3848.

Kumar, S. 2014. Selective laser sintering / melting, *Journal of Materials Processing Technology* 212: 93–134.

Leong, K., Liu, D., Chua, C. 2015. Tissue engineering applications of additive manufacturing, *Comprehensive materials processing* 69: 251–264.

Lombardo, S. S., Boninelli, F., Cristiano, G., Fisicaro, G., Fortunato, M. G., Grimaldi, G., Impellizzeri, M., Italia, A., Marino, R., Milazzo, E., Napolitani, V., Privitera, A. 2017. Laser annealing in Si and Ge: Anomalous physical aspects and modeling approaches, *Material science and semiconductor processing* 62: 80–91.

Lonardo, P., Bruzzone, A. 2000. Measurement and topography characterisation of surfaces produced by selective laser sintering, *Cirp annals – manufacturing technology* 49 (1): 427–430.

- Long, L., Liu, Q., Zhong, Z., Xiong, L., Shi, T. 2015. Experimental study on the process of laser – enhanced electrochemical micromachining stainless steel, *Optik – international journal for light and electron* 126 (19): 1862–1829.
- Ma, M., Wang, Z., Gao, M., Zen, X. 2014. Layer thickness dependence of performance in hihg – power selective laser melting of Cr18Ni9Ti stanless steel, *Journal of materials processing technology* 215: 142–150.
- Maeda, K., Childs, T. 2004. Laser sintering (SLS) of hard powders for abrasion resistant coatings, *Journal of materials processing technology* 149 (1): 609–615.
- Makinen, M., Jauhiainen, E., Matilainen, V., Riihimaki, J., Ritvanen, J., Piili, H., Salminen, A. 2015. Prelimanary comparison of properties between Ni – eelctroplated stainless steel parts fabricated with laser additive manufacturing and conventional machining, *Physics procedia* 78: 337–346.
- Manzirov, A. 2017. Advances in the theory of surface growth with applications to additive manufacturing technologies. *Procedia Engineering* 173: 11–16.
- Martinez, S., Lamikiz A., Tabernero, I., Ukar, E. 2012. Laser hardening process with 2D scanning optics, *Sciverse science direct* 39: 309–317.
- Martinez, S., Lamikiz, A., Ukar, E., Calleja A., Arrizubieta, J. A., Lopez de Lacalle, L. N. 2017. Analysis of the regimes in the scanner – based laser hardening process, *Optics and Lasers in Engineering* 90: 72–80.
- Matilainen, T., Piili, H., Salminen, A., Nyhila, O. 2015. Preliminary investigation of keyhole phenomena during single layer fabrication in laser additive manufacturing of stainless steel, *Physics procedia* 78: 377–387.
- Mazumder, J. 2017. 1 – laser – aided direct metal deposition of metals and alloys, *Laser additive manufacturing*: 21–53.
- Merklein, M., Junker, D., Shaub, A., Neubauer, F. 2016. Hybrid additive manufacturing technologies – an analysis regarding potentials and aplications, *Physics procedia* 83: 549–559.
- Mishra, S., Yadava, V. 2015. Laser beam micromachining (LBMM), *Optics and lasers in Engineering* 73: 89–122.
- Murthy, M., Varghese, I., Cetinkaya, I. 2011. Laser cleaning for removal of nano / micro – scale particles and film contamination, *Developments in surface contomination and cleaning*: 63–122.
- Nady, H., Rabiei, M., Samy, M. 2017. Corrosion behavior and electrochemical properties of carbon steel, commercial pure titanium, copper and copper-aluminum-nickel alloy in 3.5% sodium chloride containing sulfide ions, *Egyptian journal of petroleum* 26 (1): 79–94.
- Newman, S., Zhu, Z., Dhokia, V., Shorkani, A. 2015. Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies, *Cirp annals – manufacturing technologies* 64: 467–470.

Olakanmi, E., Cochrane, R., Dolgarno, K. 2015. A review on selective laser sintering / melting (SLS / SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties, *Progress in Materials Science* 74: 401–477.

Olejarova, S., Dobransky, J., Svetlik, J., Pituk, M.. 2017. Measurements and evaluation of measurements of vibrations in steel milling process, *Measurements* 106: 18–25.

Parsian, A., Magnevall, M., Beno, T., Eynian, M. 2017. Sound analysis in drilling, frequency and time domains, *Procedia CIRP* 58: 411–415.

Paul, R., Anand, S. 2012. Process energy analysis and optimization in selective laser sintering, *Journal of manufacturing systems* 34 (4): 429–437.

Paulic, M., Irgolic, T., Balic, J., Cus, F., Cupar, A., Brajilich, T., Drstvensek, I. 2014. Reverse Engineering of parts with optical scanning and additive manufacturing, *Procedia engineering* 69: 795–803.

Purtonen, T., Kalliosaari, A., Salminen, A. 2014. Monitoring and adaptive control of laser processes, *Physics procedia* 56: 1218–1231.

Ramesh, C., Srinivas, C. 2009. Friction and wear behavior of laser sintered iron – silicon carbide composites, *Journal of materials processing technology* 209 (14): 5429–5436.

Rodriguez, J., Carbonell, J., Cante, J., Oliver, J. 2017. Continuous chip formation in metal cutting processes using the particle finite element method, *International journal of solids structures* 120: 1–22.

Romano, J., Ladani, L., Sadowski, M. 2015. Thermal modeling of laser based additive manufacturing processes within common materials, *Procedia manufacturing* 1: 238–250.

Santos, L., Ferreira, J., Jesus, J., Costa, J., Capela, C. 2016. Fatigue behavior of selective laser melting steel components, *Theoretical and applied fracture mechanics* 85 (A): 9–15.

Schaeffer, R. 2012. Fundamentals of laser micromachining. New York: *CRC Press*. 260 p.

Sedlak, J., Rican, D., Piska, M., Rozkosny, L. 2015. Study of materials produced by powder metallurgy using classical and modern additive laser technology, *Procedia Engineering* 100: 1232–1241.

Shishkovsky, I. 2015. Laser controlled intermetallics synthesis during surface cladding, *Laser surface engineering*: 237–286.

Shukla, P., Lawrence, J., Zhang, Y. 2015. Understanding laser beam brightness: A review and new prospective in material processing, *Optics and laser technology* 75: 40–51.

Silva, B., Kirsch, B., Bottene, A., Simon, A., Aurich, J., Oliveira, J. 2017. Manufacturing of structured surfaces via grinding, *Journal of materials processing technology* 243: 170–183.

Slide player. [interaktyvus] 2017. [Žiūrėta 2017 m. gegužės 6 d.] Prieiga per internetą: www.slideplayer.pl

- Smolenicki, D., Boos, J., Kuster, F., Wegenar, K. 2012. Analysis of the chip formation of bainitic steel in drilling processes, *Procedia CIRP* 1: 683–684.
- Sovejeva, A., Sallamand, P., Liao, H., Costil, S. 2010. Improvement of flame spraying PEEK coating characteristics using laser, *Journal of materials processing technology* 211 (1): 12–23.
- Sovizi, M., Massudi, R. 2005. Thermal distribution calculation in diode pumped Nd: YAG laser rod by boundary element method, *Optics and laser technology* 39: 46–52.
- Sugioka, K., Cheng, Y. 2013. Ultrafast laser processing. *Hardback: Pan Stanford Publishing*. 616 p.
- Torralba, J. 2015. Improvement of mechanical and physical properties in powder metallurgy, *Comprehensive materials processing* 32 (8): 281–294.
- Trenke, D., Muller, N., Rolshofen, W. 2006. Selective laser sintering of metal and ceramic compound structures, *Intelligent production machines and systems*: 198–203.
- Ulkar, E., Lamikiz, A., Lopez de Lacalle, D., Del Pozo, J. A. 2010. Laser polishing of tool steel with CO₂ laser and high – power diode laser, *International journal of machine tools and manufacture* 50 (1): 115–125.
- Ulkar, E., Lamikiz, A., Lopez de Lacalle, L., Martinez, S., Liebana, F. 2010. Thermal model with phase change for process parameter determination in laser surface processing, *Physics procedia* 5 (B): 395–403.
- Valiulis, A. V. 2005. Naujos medžiagos. Vilnius: Technika. 280 p.
- Valiulis, A. V. 2008. Welding and thermal cutting. Vilnius: Technika. 292 p.
- Vanderesse, N., Gonzalez, I., Nuno, N., Bocher, P. 2016. Image analysis characterization of periodic porous materials produced by additive manufacturing, *Materials & design* 92: 767–778.
- Venkatesan, K., Ramaujam, R. 2016. Statistical approach for optimization of influencing parameters in laser assisted machining (LAM) of inconel alloy, *Measurements* 89: 91–108.
- Vilar, R. 2015. Laser powder deposition. *Comprehensive materials processing*: 163–216.
- Wang, D., Yang, Y., Liu, R., Xiao, D., Sun, J. 2013. Study on the designing rules and processability of porous structure based on selective laser melting (SLM), *Journal of materials processing technology* 213 (10): 1734–1742.
- Wang, S., Liao, Z., Liu, Y., Liu W. 2014. Influence of thermal oxidation temperature on the microstructural and tribological behavior of Ti6Al4V alloy, *Surface and Coatings Technology* 240: 240–477.
- Wang, S., Liu, Y., Zhang, C., Liao, Z., Liu, W. 2014. The improvement of wettability, biotribological behavior and corrosion resistance of titanium alloy pretreated by thermal oxidation, *Tribology International* 79: 174–182.

Wang, X., Gong, X., Chou, K. 2015. Scanning speed effect on mechanical properties of Ti – 6Al – 4V alloy processed by electron beam additive manufacturing, *Procedia manufacturing* 1: 287–295.

Zaeh, M., Ott, M. 2011. Investigations on heat regulations of additive manufacturing processes for metal structures, *CIRP annals – manufacturing technology* 60 (1): 259–262.

Zhang, Y., Li, S., Chen, G., Mazumder, J. 2012. Experimental observation and simulation of keyhole dynamics during laser drilling, *Optics and laser technology* 48: 405–414.

Zhang, K., Liu, W., Shang, X. 2007. Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping, *Optics & laser technology* 39 (3): 549–557.

Zhao, J., Li, Y., Zhang, J., Yu, Ch., Zhang, Y. 2003. Analysis of the wear characteristics of an EDM electrode made by selective laser sintering, *Journal of Materials Processing technology* 138 (1): 475–478.

Zhu, H., Lu, J., Ni, X., Shen, Z., Zhang, H. 2016. Measurement of thermal energy coupling to metallic materials in milisecond laser based on optical diffraction, *Optics and laser technology* 90: 84–89.

Zhu, Y., Zou, J., Chen, X., Yang, H. 2016. Tribology of selective laser melting processed parts: Stainless steel 316L under lubricated conditions, *Wear* 23: 46–55.

3D maastricht. [interaktyvus] 2017. [Žiūrėta 2017 m. gegužės 3 d.] Prieiga per internetą: www.maastricht.com

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Markovič, V., Černašėjus, O., Prokopovič, V. 2013a. Lazerinės miltelių sukepinimo technologijos analizė. *Mokslas – Lietuvos ateitis = Science – future of Lithuania: Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba = Mechanics, material science, industrial engineering and management* 5 (6): 676–679, ISSN 2029-2341. (Academic Search Complete; IndexCopernicus)

Markovič, V., Černašėjus, O. 2013b. The analysis of laser modification of the surface of sls specimens. *Solid state phenomena: Mechatronic Systems and Materials VI*. 220–221: 698–702, ISBN 9783038352273. (Scopus; INSPEC)

Vaitkūnaitė, G., Markovič, V., Černašėjus, O. 2014. Selektivityviojo lazerinio sukepinimo būdu sukepintų geležies pagrindo miltelių paviršiaus lazerinio mikroapdirbimo tyrimai. *Mokslas – Lietuvos Ateitis*. 6 (6): 661–665, ISSN 2029-2341. (Gale's Academic OneFile; ProQuest Central; ICONDA)

Markovič, V., Mierzejevska, A., Vaitkūnaitė, V., Indrišiūnas S., Lukauskaitė, R., Černašėjus, O., Golubev, V. 2016a. Investigation of the laser polishing influence on the part built by sls. *Solid state phenomena: Mechatronic Systems and Materials VII* 251: 8–13, ISBN 9783035710731. (Scopus; INSPEC)

Straipsniai kituose leidiniuose

Černašėjus, O., Markovič, V., Indrišiūnas, S., Lukauskaitė, R., Škamat, E. 2015. Лазерная микрообработка спеченных SLS изделий, Proceedings of the international scientific and practical conference “The prospects of using functional coatings”, 9th of October, Karaganda state technical university: 51–55, ISBN 9786019177.

Markovič, V., Černašėjus, O., Indrišiūnas, S., Mierzejevskaja, A., Golubev, V., Lukauskaitė, R., Škamat, E. 2016b. Исследование трибологических свойств SLS спечённых железоникелевых порошков, Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 12-й Международной научно-технической конференции, (Минск, 25–27 мая 2016 г.): 209–211, ISBN 9789850820044.

Markovič, V., Černašėjus, O., Indrišiūnas, S., Golubev, V., Lukauskaitė, R., Škamat, E., Višniakov, N. 2016c. Исследование поверхностных слоёв, полученных методом лазерной обработки на образцах, полученных методом селективного лазерного спекания, Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Кн. 2 Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки: сборник научных трудов, Минск: 283–287, ISBN 9789856441496.

Markovič, V., Černašėjus, O., Škamat, E., Lukauskaitė, R., 2017. Исследование поверхностных слоёв, полученных методом лазерной обработки на образцах, полученных методом селективного лазерного спекания, Proceedings of the International scientific-practical conference “Science and education as a leading factor in strategy Kazakhstan – 2030” (Saginov's readings No. 4), June 28–29, Part 1, Karaganda: Karaganda State Technical University: 34–37, ISBN 978-601-315-291-2.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

Recently, a considerable attention is paid to manufacturing advanced and innovative products of geometrically complicated shapes. In most cases, upon striving for improving the performance characteristics of details, assembly units or equipment, it is necessary to form complicated cooling, lubrication or air channel spatial systems inside the details without any violations and changes of the external shape of the product. To achieve the said goal, Selective Laser Sintering technology, or SLS technology, is applied.

SLS technology ensures a high accuracy of the shape of the produced details and reproducibility of the production; however, application of SLS technology for metalware production is limited. Laser sintering of metal powder is a multiplex process that results in a formation of a distinctive structure; the principal peculiarity of the said structure is a system of interconnecting pores of various sizes. During a formation of each layer, hardening of the material from the liquid phase at a high temperature gradient takes place that causes an appearance of considerable residual tensile stresses. The totality of the above-described causes a deterioration of the mechanical and tribological properties, as compared to the traditional moulding. A majority of details manufactured upon applying SLS method are not usable for a long period. Upon unfavourable operating conditions (such as considerable temperature fluctuations, wear, moisture and so on), the service period of sintered products is 2–3 years only.

At present, industry needs new innovative methods for processing and modifying the surfaces of sintered products. The opportunities of applying these technologies and the advantages provided by them would improve the performance characteristics of details, assembly units or equipment and reduce the operating expenses.

The offered traditional methods for processing and modifying the sintered surfaces are very expensive and require considerable time input. If the traditional methods are applied for processing the surfaces of the said type, only the geometry of the detail is affected, without a possibility to modify the surface under processing.

The relevance of the thesis

Recently, the requirements related to environmental pollution caused by industrial equipment, motor vehicles, agricultural equipment and so on are tightened worldwide. To meet the said requirements, it is necessary to optimize the manufacturing processes and to reduce the costs of repairs. Therefore, at present there is a great need in rapid and economically effective technologies for production as well as for processing and modification of the surface layer of metal.

The idea of the work: to apply a subsequent laser microprocessing for improving the manufacturing technology of products sintered by SLS method and to establish the impact of laser modification of the surface layer on the process of formation of the layer as well as its physical properties and performance characteristics. Final surface modification by laser would enable to avoid the imperfections typical for the ones caused by the traditional SLS technology (such as thermal tensile stresses, large pores, roughness of the surface and large expenses of mechanical processing) and to improve considerably the performance characteristics of the sintered product, as compared to the ones with non-processed surface. A high accuracy laser beam focusing enables to process strictly fixed fragments of a detail and to obtain thin (0.01–0.3 mm) layers of modified metal. Short duration of the process and precisely dosed energy input will ensure the minimum area of thermal effect and absence of deformations.

The investigation of the process of laser modification of sintered product surface will provide new knowledge about the process of the surface layer formation. The obtained knowledge will enable to optimize the main parameters of a product sintered by pulse laser. This, in its turn, will improve a resistance of such materials to wear and corrosion, reduce their structural and surface inhomogeneity, reduce the prime cost of the product and increase its resource.

The object of the research

The surface iron-nickel-cobalt based layers formed by selective sintering method and processed by laser microprocessing method.

The aim of the thesis

To establish the impact of laser microprocessing the surface layer of products sintered by SLS method on the layer formation process as well as its physical properties and performance characteristics.

The tasks of the work

For an implementation of the aim of the thesis, the following tasks were set:

1. To investigate the impact of technological parameters of laser microprocessing on morphology, topography, physical & mechanical properties and the chemical composition of SLS sintered layers.
2. To establish the optimum technological parameters of laser microprocessing for ensuring the best performance characteristics of multifunctional surface based on Fe-Ni-Co powder.

The research methodology

Analytic and experimental research methods were applied in the thesis.

In the work, the impact of rapid laser microprocessing on the formation of the surface layer of products sintered by SLS method as well as its physical properties and performance characteristics was investigated. For the tests, the sintered specimens based on Fe-Ni-Co powder and additionally processed by a concentrated energy source were used. The properties of Fe-Ni-Co powder were examined upon applying scanned electron microscopy, X-ray microanalysis and X-ray diffraction. The microstructure and the phases of the sintered specimens as well as sintered specimens processed by laser beam were examined upon applying the modern material testing methods, such as scanned electron microscopy, X-ray microanalysis and X-ray diffraction. The physical properties and performance characteristics of surfaces of the sintered specimens as well as sintered specimens processed by laser beam were examined by carrying out hardness, wear, corrosion and profilometry tests.

The scientific novelty of the thesis

Recently, Selective Laser Sintering Technology is widely used in the today works for manufacturing structural parts of complicated shapes. SLS technology is very promising in the sectors of energy facilities, motor vehicles, aircrafts, space exploration, printing engineering, medicine et cetera.

In course of the tests, the optimum parameters of subsequent rapid laser microprocessing the sintered products based on Fe-Ni-Co powder had been established. The tests confirmed that a subsequent laser microprocessing of products sintered by SLS method ensured a formation of a new surface layer of the sintered metal (of higher density and modified) with a better topography of the surface and improved hardness and wear resistance. In course of preparation of the Thesis, the following results innovative for material engineering science were obtained:

1. An application of subsequent laser microprocessing technology of products (based on Fe-Ni-Co powder) sintered by SLS method enabled to create the multifunctional layer on the surface of the sintered specimen that distinguishes for improved performance characteristics.
2. The established correlation between the morphology, topography, phase composition as well as mechanical, tribological and anti-corrosive properties of the surface of specimens sintered by SLS method and processed by a nanosecond laser with the laser treating process and its parameters enables cho-

osing the optimum parameters of the processing mode for specific operating conditions.

The practical value of the research finding

An application of subsequent laser microprocessing technology of products (based on Fe-Ni-Co powder) sintered by SLS method could be applied in the industry fields where very important products with sophisticated shape are used widely (plastic injection tools, parts of the engines and turbines etc.).

The defended statement

A high accuracy of subsequent laser microprocessing the specimens sintered by SLS method, with precisely dosed energy input and a short duration of the processed layer formation cause a formation of a new modified surface layer of the sintered metal and ensure a better topography of the surface as well as improved hardness and wear resistance.

Approval of the research findings

Total 8 scientific papers on the subject of the Thesis have been published: 4 papers were published in scientific journals reviewed in international databases and 4 papers – in reviewed scientific publications.

The results of the research described in the Thesis were presented at ten scientific conferences in Lithuania and abroad:

- at the Conferences of Young Scientists “*Science – the Future of Lithuania*” held in the years 2011 and 2014 in Vilnius;
- at the International Conference “*Mechatronic Systems and Materials*” held in 2013 in Vilnius and in 2015 in Kaunas;
- at the International Conference “*Advanced Materials and Technologies*” held in 2013 in Palanga;
- at the International Conference “*The Prospects of Using Functional Coatings*” held in 2015 in Karaganda;
- at the International Conference “*New Materials and Technologies: Powder Metallurgy, Composite Materials, Protective Coatings, Welding*” held in 2016 in Minsk;
- at the International Conference “*Modern Methods and Technologies for Creation and Processing of Materials*” held in 2015 and 2016 in Minsk;
- at the International Conference “*Science Integration, Education and Production – Basis of the Implementation of the Plan of the Nation: Saginov’s Readings № 9*” held in 2017 in Karaganda.

The structure of the thesis

The thesis includes the introduction, three chapters and the general conclusion. In addition, five annexes are enclosed.

The thesis consists of 106 pages, except of those of the Annex; in the text, 6 numbered formulas, 53 Figures and 13 Tables are provided. In course of preparation of the Thesis, 109 sources of the literature were used.

1. The peculiarity analysis of the additive manufacturing and modification of the metallic surfaces

Additive manufacturing (AM) enables to produce details, assembly units or equipment of particularly complicated geometric shapes and to implement complex technological solutions. Selective Laser Sintering technology, or SLS technology, is a process included in the group of AM technologies.

Metal powder sintering by laser is a multiplex process that results in a formation of a distinctive structure; the principal peculiarity of the said structure is a system of inter-connecting pores of various sizes. In course of melting of metal powder particles, pores and cavities up to 100 μm are formed in the material upon action of the thermocapillary forces. During a formation of each layer, hardening of the material from the liquid phase at a high temperature gradient takes place that causes an appearance of considerable residual tensile stresses. The totality of the above-described causes a deterioration of the mechanical and tribological properties, as compared to the traditional moulding. For this reason, formation of metal products upon applying SLS method is limited.

Microprocessing of surfaces of sintered products by a laser beam is one of the methods for tackling the problems caused by Selective Laser Sintering. The duration of the interaction between the laser beam and the surface under processing is a very important parameter that predetermines the impact of the laser beam on the material. While analyzing the interaction between the laser beam and solid bodies, the principal optical phenomena important for laser processing of surfaces should be taken into consideration. During laser processing, the absorption and reflection of laser radiation vary dynamically, so thoroughful investigation of the dependence of the properties of the material under processing on the changes of the parameters of the laser beam is required to ensure a good result of processing the engineering material.

The most important property of lasers used in processing of materials is a possibility to achieve very high intensity of radiation in a chosen point of the surface under processing that is hard to achieve upon applying another processing methods. Upon varying the energy input, it is possible to create different laser processing methods based of different physical processes, such as heating, melting, ablation or evaporation.

A subsequent processing of sintered surface by a source of concentrated energy will ensure much better physical and mechanical properties of the surface layer, as compared to the traditional processing methods; in addition, it will improve other characteristics of the processed surfaces as well. This will enable to increase the resource of sintered products and to save energy and materials. So, it is purposeful to investigate laser sintering with a subsequent laser processing in order to assess the efficiency and benefits of the newly created process.

2. Materials used and methods of investigation of the sintered surface based on iron-nickel-cobalt powder

For a formation of the sintered volume, Fe-Ni-Co powder was used as a base. The steel grade was chosen upon taking into account very broad opportunities of use of the material in production of polymer casting equipment.

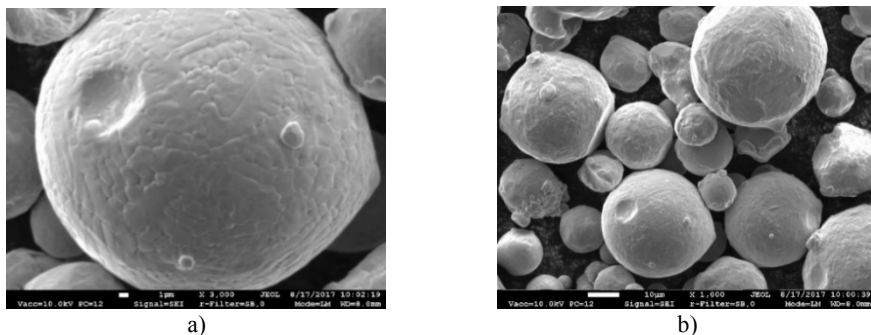


Fig. S2.1. Morphology of the powder usable for sintering

The analysis of the powder for selective laser sintering showed that the size of their fractions varies between 7 and 30 μm . Particles of the powder are of irregular geometric shapes (Fig. S2.1). On the surface of the particles, a dendrite primary crystallization structure can be seen (Fig. S2.1, a). A part of the powder particles is presented by formations consisting of a large particle and several small fractions adhered to it (Fig. S2.1, b).

For production of the powder-based specimens, selective laser sintering equipment Concept Laser M3 was used.

For separation of the sintered volume from the substrate, the wire spark erosion machine Charmille cut 200 was used. The specimens separated from the substrate were cleaned in an ultrasonic bath filled with $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ solution. The duration of cleaning was 15 minutes. The temperature of the cleaning medium was 40 $^{\circ}\text{C}$.

In course of microscopic tests of the sintered specimens, it was found that top and lateral surfaces of the specimens distinguished for absolutely different morphologies of the surface layer. In case of a lateral surface, irregularly and chaotically distributed bumps can be seen (Fig. S2.2, a). Whereas in case of the top surface, a regularly formed fracture (Fig. S2.2, b) can be seen. This essential difference is caused by the technological peculiarities of selective laser sintering process.

For laser microprocessing the sintered specimens, a nanosecond pulse laser Baltic HP was chosen. The sintered workpiece, separated from the substrate by the wire spark erosion machine Charmille cut 200, was divided to specimens of the same size ($10 \times 10 \times 10 \text{ mm}$).

The experimental tests of laser microprocessing of sintered surfaces were divided to four essential phases:

The experiment A – a partial processing of the top surface polished to $R_a = 0.2 \mu\text{m}$ while pushing a specimen in the only direction. The power P of the laser was varied from 1 to 4 W, the processing speed v – from 1 to 7.5 mm/s, the number of passes n was 1.

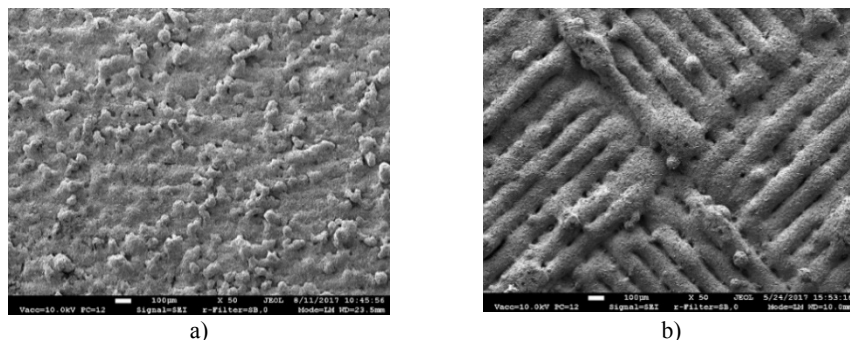


Fig. S2.2. The topography of sintered specimens: a) the lateral surface of a sintered specimen; b) the top surface of the sintered specimen

The experiment B – a complete processing of the top surface polished to $R_a = 0.2 \mu\text{m}$ while pushing a specimen in two directions. The power P of the laser was 2.5 W, the processing speed $v = 2.5 \text{ mm/s}$, the number of passes n was varied from 1 to 4.

The experiment C – a complete processing of a sintered lateral surface while pushing a specimen in two directions. The power P of the laser was varied from 2 to 3 W, the processing speed v - from 1 to 5 mm/s, the number of passes n – from 1 to 6 (Table S2.1).

The experiment D – a complete processing of the sintered top surface while pushing a specimen in two directions. The power P of the laser was varied from 2 to 3.5 W, the processing speed v – from 1 to 5 mm/s, the number of passes n – from 1 to 4 (Table S2.2).

Table S2.1. The technological parameters of laser processing in the experiment C

The mark of a specimen	A processing parameter			The level of energy input
	Power P , W	Processing speed v , mm/s	Number of passes n	
C1	2	1	1	E3
C2	2	2.5	1	E2
C3	2	5	1	E1
C4	2.5	1	1	E3
C5	2.5	2.5	1	E2
C6	2.5	5	1	E1
C7	3	1	1	E3
C8	3	2.5	1	E2
C9	3	5	1	E1
C10	2.5	2.5	2	E2
C11	2.5	2.5	4	E2
C12	2.5	2.5	6	E2

In laser microprocessing, a very important role is played by energy input E provided to area S within time period t . For systematization of the technological parameters of

laser microprocessing, the energy input levels were calculated and distributed in the work.

Table S2.2. The technological parameters of laser processing in the experiment D

The mark of a specimen	A processing parameter			The level of energy input
	Power P , W	Processing speed v , mm/s	Number of passes n	
D1	2	1	1	E3
D2	2	2.5	1	E2
D3	2	5	1	E1
D4	2.5	1	1	E3
D5	2.5	2.5	1	E2
D6	2.5	5	1	E1
D7	3	1	1	E3
D8	3	2.5	1	E2
D9	3	5	1	E1
D10	3.5	1	1	E3
D11	3.5	2.5	1	E2
D12	3.5	5	1	E1
D13	2.5	2.5	2	E2
D14	2.5	2.5	4	E2

In the work, complex research of a sintered surface processed by a concentrated energy source has been completed. During the research, the macro- and the micro-structure of the sintered surface processed by a concentrated energy source as well as its chemical composition were analyzed. The microhardness and microroughness tests of the surface layer of the experimental specimens have been performed. The tribological properties of the surfaces have been explored. The corrosion tests have been carried out as well.

The morphology of sintered specimens processed by a concentrated energy source has been examined upon using scanned electron microscopy device SEM JEOL JSM-7600F with SE detector of secondary electrons. The parameters of electron microscopy are following: the accelerating voltage 10 kV, the distance to the surface of the specimen 11 mm, the magnification from 50 to 1000 times, temperature 22 °C. The surfaces of sintered specimens after laser processing were analyzed by SEM method upon using the stream of secondary electrons. Surfaces of the specimens were cleaned with C_3H_8O solution. In addition, the chemical composition of the raw material (the powder) and the experimental specimens were analyzed upon applying the method of X-ray microanalysis.

The qualitative analysis of phase composition of sintered specimens after laser processing by a concentrated energy source was carried out by X-ray diffractometer SMART LAB (Japan). For separation of the X-ray radiation, a graphite monochromator was used. The parameters of the tests were following: the voltage 9 kV, the diffraction angle 2θ range from 20 to 80°, the step of detector movement – 0.02°. The diffractogram was recorded at a speed of 1°/minute. The test was performed at the

temperature of 22 °C. The tests were carried out with specimens based on Fe-Ni-Co powder that were sintered and additionally polished and processed by laser beam. All the results of the analysis are provided as diffraction curves that show the dependence of the intensity of the reflected X-rays on the detector's angle.

The parameters of the surface microroughness of the sintered specimens after their processing by a concentrated energy source were established using the portable profilometer TR-200 with measuring accuracy $\pm 0.01 \mu\text{m}$.

The microhardness of sintered specimens after their processing by a concentrated energy source was assessed in polished microsections using the versatile automated hardness meter *Zwick Roell ZH μ* with 1% measurement error. The measurements were carried out by Vickers hardness test at the load of 100 g and the exposure time of 10 s at the optical magnification of 50 times. The average microhardness of the surface layer of the sintered specimen after its processing by a concentrated energy source was calculated on the base of results of 10 measurements, upon rejection of the maximum and the minimum values.

The friction resistance of sintered specimens under investigation after their processing by a concentrated energy source in the experiment C was assessed on the dry friction test. In the experiment C, it was carried out by Microtest tribometer upon the following modes of the experiment: the sliding distance – 200 m, the sliding speed – 300 rpm, the radius of the trajectory – 2 mm, the load – 5 N, the temperature of the test – 23 °C. For the experimental test, “Pin-on-disc” friction scheme was chosen. The indenter was a 3 mm diameter tempered cylinder made of stainless steel 1.4034.

The friction resistance of sintered specimens after their processing by a concentrated energy source in the experiment D was assessed on the dry friction test using Microtest tribometer upon applying the following modes: the sliding distance – 400 m, the sliding speed – 300 rpm, the radius of the trajectory – 2 mm, the load – 5 N, the temperature of the test – 23 °C. For the experimental test, “Ball-on-disc” friction scheme was chosen. The indenter was a 6 mm diameter tempered ball (usable in bearings) made of stainless steel AISI52100.

The corrosion resistance of sintered specimens after their processing by a concentrated energy source was assessed by measurements of potentiodynamic polarization. The experimental tests were carried out using the electrochemical measurement system SOLARTON 1280C (United Kingdom). It consists of a potentiostat, a galvanostat, a frequency generator and an impedance spectrum analyzer. The measurements were carried out upon using a 3-electrode electrochemical cell. A platinum wire was used as an auxiliary electrode and the reference electrode was Ag/AgCl/KCl. The corrosion resistance tests were carried out in 0.5 M Na₂SO₄ medium. Electrochemical measurements were carried out after 60 minutes, when the corrosion potential was settled by spreading the potential towards the anode and the cathode. The potential spreading speed was 10 mV/s. The electrochemical parameters, such as the corrosion potential (E_{kor}) and corrosion current (j), were researched upon applying the relevant data processing software.

3. The investigation of the process of modifying the surface of sintered specimens based on powder by a concentrated energy source and the performance characteristics of the specimens

In the Chapter, an analysis of characteristics of sintered specimens subsequently processed by a concentrated energy source is provided. In addition, the impact of the laser beam technological parameters on the morphology, profilometry, chemical and phase composition as well as the performance characteristics and mechanical properties of the surface under processing is described.

In course of the microscopic test, it was found that the average roughness of a sintered non-processed lateral surface was $R_a=9.2 \mu\text{m}$, whereas the roughness of the top surface was $R_a=17.9 \mu\text{m}$. The difference is caused by the technological peculiarities of the selective laser sintering process.

In course of the tests on morphology and topography of lateral surfaces of specimens sintered according to SLS technology and subsequently passed microprocessing by laser, three essential features of the surface were formed, including: porous and insufficiently melted; irregularly vaporised with chaotically distributed bumps and; uniformly and targetedly vaporised. When the lateral sintered surface is processed in a single pass (the specimen C5), the average height of microroughness was reduced by 50%, as compared to the sintered specimen without a subsequent processing (Fig. S3.1). An increase of the number of laser microprocessing passes from 1 to 2 (the specimen C5), caused no noticeable impact on the indicators of the profilometry of the surface and the average value of the roughness remained almost the same ($R_a=5.4 \mu\text{m}$). When the number of passes was increased to 4, the decrease of the roughness down to $R_a=4.27 \mu\text{m}$ was observed on the surface of the specimen. The change of the roughness, when the number of passes is increased from 1 to 4, is predetermined by additional vaporisation of the tops of surface microroughnesses.

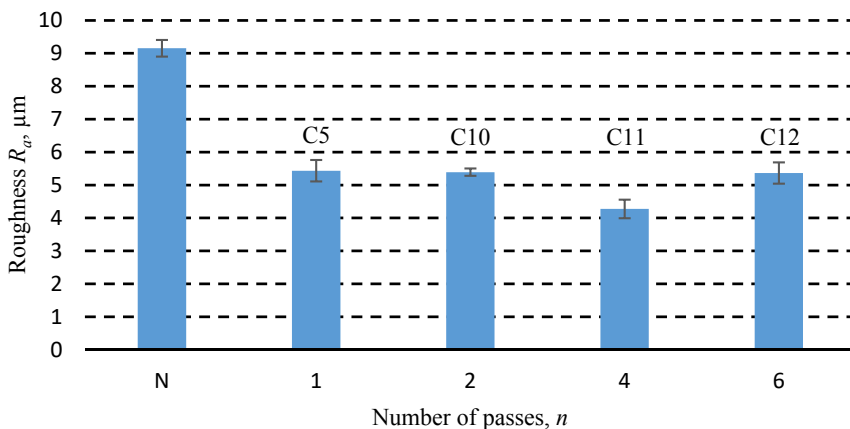


Fig. S3.1. The dependence of the roughness of specimens on the laser processing speed at different processing powers in the experiment C

When the number of passes is further increased up to 6 (the specimen C12), cracks are formed on the surface of the specimen and the average height of microroughnesses increases to $5.37\text{ }\mu\text{m}$. It is predetermined by the metal surface overheating and changes of thermal processes.

When the top sintered surface was processed in a single pass at the stream power $P = 2.5\text{ W}$ and the processing speed of 2.5 mm/s , the average height of microroughnesses decreased by about 60% (the specimen D5). The increase of the number of passes to 2 causes a negative impact on the roughness of the surface: the roughness of surface of sintered and subsequently laser-processed specimens doubles, i.e. increases from $R_a = 6.22\text{ }\mu\text{m}$ (the specimen D5) to $R_a = 12.17\text{ }\mu\text{m}$ (D13). The increase of the number of passes of laser microprocessing to 4 causes a further increase of the roughness up to $R_a = 18.41\text{ }\mu\text{m}$ (the specimen D14). The increase of roughness is predetermined by overheating of the processed surface and formation of cracks on the surface.

During the microhardness test in the experiment C, it was found that the microhardness of sintered and laser processed layer increases at a transfer from the energy level E1 to the energy level E3 when laser processing speed is reduced and the laser power is increased. The maximum difference between the values of microhardness of specimens processed at power of 2–3 W is up to 10%. The difference between hardnesses of unprocessed specimen (297 HV) and laser-processed specimens achieves up to 88%. The maximum value of hardness of laser processed specimens is 558 HV (the specimen D10) achieved at the energy input level E3, when $P = 3.5\text{ W}$, $V = 1\text{ mm/s}$ and while working in a single pass processing mode.

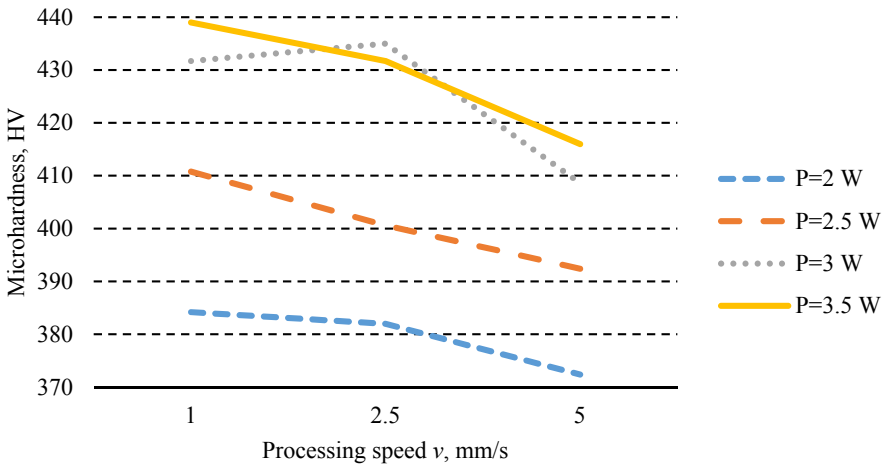


Fig. S3.2. The dependence of the microhardness of specimens on the laser processing speed at different values of processing power in the experiment D

During the microhardness test in the experiment D (Fig. S3.2), it was found that on increase of energy input in laser processing (transfer from the energy input level E1 to

the energy input level E3), the microhardness of sintered and laser processed layer increases both in the cases of the experiment C and the experiment D.

While comparing the hardness of unprocessed specimen (297 HV) and a laser processed specimen, the difference achieves 48% (experiment D). The maximum value of microhardness, i.e. 439 HV (the specimen D10), is obtained at the laser processing energy input level E3, when $P = 3.5$ W, $V = 1$ mm/s at the number of passes equal to one. The maximum difference between the values of microhardness of specimens processed by power 2 and power 2.5 W was 10.5% and the maximum difference between the values of microhardness of specimens processed by power 2.5 and power 3 W was 12%. Further increasing the power of laser processing does not provide a positive impact on the microhardness of sintered and laser processed metal and the maximum difference between the values of microhardness of specimens processed by powers 3 and 3.5 W is only 1.6% even at the maximum processing speed. This shows that increasing the power of laser processing does not cause a considerable impact on the microstructure of the processed metal as well as its phasic and chemical composition.

During the investigation, it was found that increasing the number of laser microprocessing passes practically caused no impact on the indicators of the microhardness of the sintered material. An analogous dependence was observed both in the cases of the experiment C and the experiment D.

During the wear resistance tests in the experiment C, it was found that the unprocessed specimen's lateral surface mass loss achieved 2270 μg . In course of the experiment, it was established that on processing the sintered lateral surface by laser radiation, the following general trend took place: the minimum mass losses (when the number of passes $n = 1$) were observed at the laser processing energy level E3. It was predetermined by increasing the heat input, when the processing speed reduced from 5 to 1 mm/s, and the maximum microhardness of metal surface.

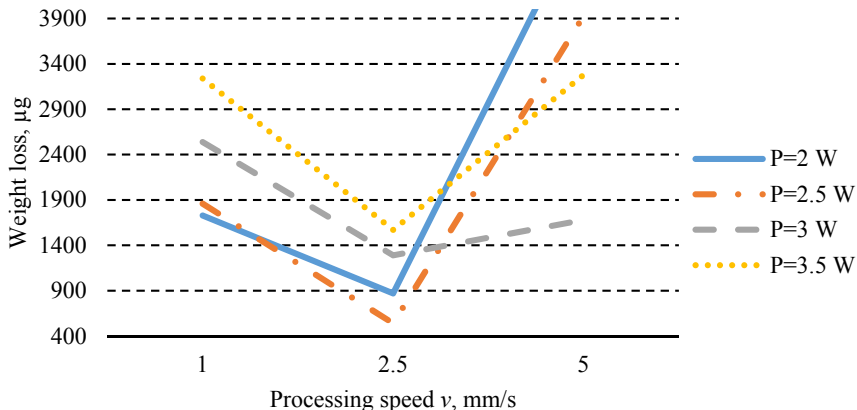


Fig. S3.3. The results of specimen wear resistance tests in the experiment D

The minimum specimen mass loss (180 μg) in the experiment C (the specimen C11) took place at the energy input level E2 (when $P = 2.5$ W and $V = 2.5$ mm/s) and the

number of passes equal to four. In such a case, the minimum mass loss was predetermined by the minimum value of the average height of microroughness of the specimen C11 surface, i.e. $R_a = 4.27 \mu\text{m}$. The additional laser processing of the sintered surface, when the number of passes n was increased from 2 to 4, reduces the values of surface microroughness of specimens from the series C and this positively affects the mass loss indicators of the specimen.

During the wear resistance test in the experiment D, it was found that the unprocessed specimen's top surface mass loss achieved $9070 \mu\text{g}$. The results of the test showed (Fig. S3.3) that at the laser processing power from 2 to 3.5 W and the processing speed $V = 1 \text{ mm/s}$, the mass loss of laser processed surface was from 1730 to $3240 \mu\text{g}$ (the specimens D1–D4).

Increasing the laser microprocessing speed up to 2.5 mm/s (the energy input level E2) ensured the minimum mass loss of laser processed surface, i.e. from 540 to $1570 \mu\text{g}$ (specimens D5–D8). It was predetermined by the less height of microroughness of specimen surface processed at the speed of 2.5 mm/s . Further increasing the speed of laser processing to $V = 5 \text{ mm/s}$ caused an increase of mass loss of specimens from the series D that became from 1860 to $3930 \mu\text{g}$ (the specimens D9–D12). The maximum mass loss was observed in specimens processed by the speed of 5 mm/s (the energy input level E1); it was predetermined by the minimum microhardness of the specimens D3, D6, D9 and D12 and the maximum roughness of them. The mass loss of laser processed specimens of the series D directly correlates with the results of the surface profilometry tests. When sintered top surface is processed by laser radiation, the minimum mass loss $540 \mu\text{g}$ (the specimen D5) is observed at the energy input level E2, when $P = 2.5 \text{ W}$; $V = 2.5 \text{ mm/s}$ (Fig. S3.3).

During the tribological test in the experiment C, it was found that the arithmetic mean of friction coefficient of the unprocessed lateral surface is equal to 0.94. After laser microprocessing of the sintered lateral surface (when $P = 2.5 \text{ W}$ and $V = 2.5 \text{ mm/s}$), upon the number of passes not exceeding 2 (the specimens C5 and C10), the value of friction coefficient was 0.46 and 0.54 respectively. The difference between the unprocessed sintered surfaces and the ones having passed laser processing was predetermined by the peculiarities of the topography of the surface (sintered by SLS) and possibly formed intermetallic compounds in the top layer of the processed specimen. On increasing the number of laser processing passes to 4, the minimum value of the arithmetic mean of friction coefficient (0.35) was obtained (the specimen C11). It was predetermined by the minimum roughness of the laser processed surface of the specimen C11.

During the tribological test in the experiment D, it was found that the arithmetic mean of friction coefficient of the unprocessed top surface is equal to 1.05. It was predetermined by extraordinary high roughness of the unprocessed top surface ($R_a = 17.9 \mu\text{m}$). Whereas the value of friction coefficient of the sintered top surface after laser microprocessing in a single pass, when $P = 2.5 \text{ W}$ and $V = 2.5 \text{ mm/s}$ (the specimen D5) is 0.95. The difference between the unprocessed sintered surfaces and the ones having passed laser processing was predetermined by the peculiarities of the topography of the surface (sintered by SLS), high microhardness and low roughness of the laser processed surface $R_a = 6.22 \mu\text{m}$ (the specimen D5). The minimum value of the arithmetic mean of friction coefficient (0.81) was obtained (the specimen D10) at the power of 3.5 W and the pro-

cessing speed of 1 mm/s. It was predetermined by the maximum (439 HV) microhardness of the laser processed surface (the specimen D10). In course of the investigation, it was found that the values of friction coefficient correlate with the values of microhardness of the top surface of the specimens D5 and D10, i.e. 279 HV, 401 HV and 439 HV, respectively.

During the tribology and wear resistance test, it was found that on laser microprocessing of sintered specimen, the friction coefficient of the top and lateral metal surface decreased by 19% and 63%, respectively; and the rate of wear of laser processed metal surface layer – 17 and 39 times, respectively.

During the phasic analysis of sintered (by SLS) and unprocessed surface of the specimen, it was found that the structure of the surface metal layer under investigation consists of a martensitic structure with cubic centered volume grating (lattice) and residual austenite.

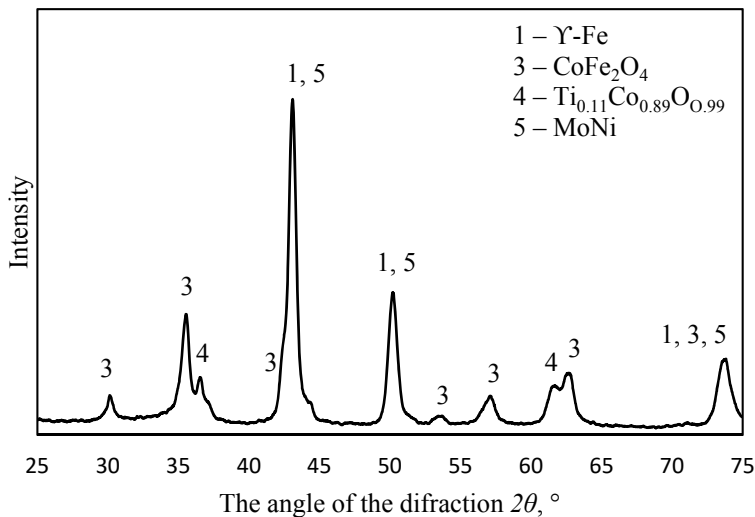


Fig. S3.4. The curve of X-ray diffraction of laser processed specimen D5

On the base of analysis of the diffraction curve (Fig. S3.4), it was found that the laser radiation caused a formation of an intermetallic compound of residual austenite and molybdenum/nickel as well as oxides, such as cobalt iron oxide CoFe_2O_4 , titanium cobalt oxide $\text{Ti}_{0.11}\text{Co}_{0.89}\text{O}_{0.99}$ and iron oxide Fe_3O_4 , on the surface of the specimens under investigation. Increasing the speed of laser microprocessing causes a reduction of the concentration of solid metal oxides (Fig. S3.5). It is bound with a lower temperature of the laser processed surface, a shorter exposure time and the oxidation processes on the metal surface. The established dependence correlates with the changes of microhardness of surfaces sintered by SLS and processed by laser caused by increasing the speed of processing. Increasing the laser microprocessing speed from 1 mm/s to 5 mm/s at the

power of 2.5 W causes a reduction of concentration of solid metal oxides from 70% to 36% (Fig. S3.5). An analogous change of the speed of laser microprocessing at the power of 3 W causes a reduction of concentration of solid metal oxides from 68% to 37%.

While examining the microstructure of sintered and laser processed specimens, it was found that because of specific heat input (typical for laser processing), the microstructure of the sintered products was not perfect. It consists of chaotically distributed oblong needle-shaped grains. The dark fragments visible in the microstructure are the traces of residual austenite and admixtures.

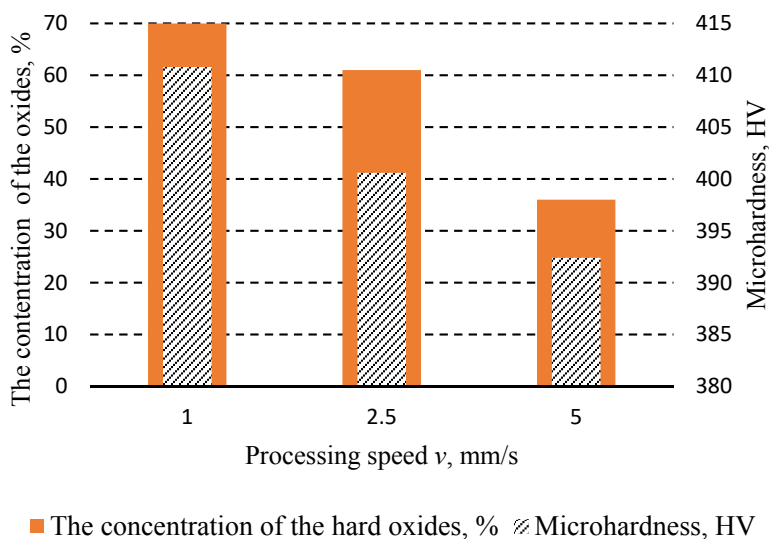


Fig. S3.5. The dependence of the hardness of specimens sintered by SLS method and having passed a subsequent laser microprocessing on the concentration of solid metal oxides at different processing speeds

The microstructure of the surface layer of sintered specimen subsequently having passed laser microprocessing is very similar to the microstructure on the unprocessed specimen. The similarity of the structures also attests the minimum residual tensions on the surface of sintered and subsequently laser processed specimen. It was found that the microstructure of the laser processed surface consisted of chaotically distributed oblong needle-shaped grains. The peripheral areas of the grains distinguish for distinctive rugged fracture possibly formed by the residual austenite in the grains.

The electrochemical corrosion analysis of the specimens sintered by SLS and subsequently processed by laser radiation provides a basis for stating that laser does not cause a negative impact on corrosive resistance of the sintered surface.

General conclusions

1. The technology of subsequent laser microprocessing of products on the base of Fe-Ni-Co powder sintered by SLS method enables to modify the sintered metal. The impact of laser microprocessing (the power of the laser beam, processing speed and a number of passes) of the metal surface layer of the sintered products (based on Fe-Ni-Co powder) on the layer formation process as well as its physical properties (microhardness, wear speed, surface roughness, corrosion resistance etc.) and performance had been established.
2. The morphology of the surface of products on the base of Fe-Ni-Co powder sintered by SLS and having passed subsequent laser microprocessing depends on the level of input energy in laser processing. While laser microprocessing at $V = 2.5$ mm/s and $P = 2.5$ W, the roughness parameter R_a for the lateral and the top surface (vertical and horizontal surface) reduced by 54% and 65%, respectively was equal to $R_a = 4.27$ μm and $R_a = 6.22$ μm , respectively.
3. The hardness of the surface of products on the base of Fe-Ni-Co powder sintered by SLS method and having passed subsequent laser microprocessing depends on the concentration of solid oxides CoFe_2O_4 and $\text{Ti}_{0.11}\text{Co}_{0.89}\text{O}_{0.99}$ formed in the top metal layer during laser processing. When the concentration of solid oxides increases, the microhardness of the top metal layer grows. At the concentration of solid oxides $\approx 70\%$ ($P = 2.5$ W; $V = 2.5$ mm/s), the microhardness of sintered surfaces after laser processing increased by 88% and 48%, as compared to unprocessed surfaces and was equal to 558 HV and 439 HV, respectively.
4. The rate of wear of the surface of products on the base of Fe-Ni-Co powder sintered by SLS and having passed subsequent laser microprocessing is predetermined by a complex change of microhardness and morphology of top metal layer after laser processing. The increased microhardness of the lateral (from 71% to 88%) and the top (from 25% to 48%) surface as well as the decrease of the average height of the microroughnesses of the lateral surface by 54% and of the top surface – by 65% (at $P = 2.5$ W; $V = 2.5$ mm/s), as compared to an unprocessed specimen, predetermines a reduction of the rate of wear of the lateral and top surface, as compared to the unprocessed specimens, 39 times and 17 times, respectively.

Priedai³

- A priedas.** Geležies lydiniams legiruoti dažniausiai naudojami legiruojantieji elementai
- B priedas.** A–D eksperimentinių tyrimų technologinių parametrų reikšmės
- C priedas.** Autoriaus sąžiningumo deklaracija
- D priedas.** Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje
- E priedas.** Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Vladislav MARKOVIČ

DAUGIAFUNKCIŲ PAVIRŠIŲ
IŠ GELEŽIES-NIKELIO-KOBALTO MILTELINIŲ
MEDŽIAGŲ FORMAVIMAS IR TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
medžiagų inžinerija (08T)

THE FORMATION AND INVESTIGATION OF
MULTIFUNCTIONAL SURFACES FROM
IRON-NICKEL-COBALT POWDER MATERIALS

Technological Sciences,
Materials Engineering (08T)

2018 07 13. 10,0 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius